

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Jakub Mareš

Diplomová práce

**Určení hloubky výparové fronty v pískovcích a dalších porézních materiálech: využití
jehel obalených uraninem**

**Determination of the vaporization plane depth in sandstones and other porous
materials: uranine-coated needles**

Vedoucí diplomové práce: Mgr. et Mgr. Tomáš Weiss

Konzultant: doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Praha, 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 8. 5. 2019

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli, Tomáši Weissovi, za pomoc při vymýšlení metody a spolupráci při jejím používání v terénu a za komentáře a asistenci při psaní práce. Dále bych chtěl poděkovat Jiřímu Bruthansovi a Martinu Slavíkovi za cenné rady při měření a psaní, Gregovi Carlingovi z Brigham Young University a Alanovi a Lindě Mayo za zázemí a rady při měření v Utahu a Janu Válkovi a Janě Maříkové-Kubkové za umožnění měření na Pražském hradě.

Práce byly financovány grantovou agenturou České republiky GAČR (GA16-19459S a GA19 – 14082S) a grantovou agenturou Univerzity Karlovy GAUK (#1046217).

Abstrakt

Výparová fronta v porézních materiálech odděluje kapilární zónu, což je oblast, kde se voda pohybuje v kapalném skupenství, od suché přípovrchové zóny, kde se voda pohybuje ve formě vodní páry. Hloubka výparové fronty a její geometrie je zásadní pro velké množství fyzikálních, chemických a biologických procesů v porézních materiálech, které např. způsobují degradaci materiálu a jeho rozpad. Výparová fronta se většinou neměří přímo, ale používá se měření vlhkosti nebo sacího tlaku, které ale pro její detekci nejsou dostatečně vhodné. Z tohoto důvodu bylo potřeba vytvořit metodu, která by byla schopna určit hloubku výparové fronty v otvoru o malém průměru. Toho jsem docílil pomocí jehly, na kterou jsem nanesl lepidlo a uranin. Po vložení dojde k rozpuštění uraninu v kapilární zóně a změně jeho barvy z červené na zelenou, zatímco v suché zóně zůstane barva uraninu nezměněná. Hranice mezi červenou a zelenou barvou uraninu tak přesně zobrazuje výparovou frontu. S touto nově vyvinutou metodou jsem následně měřil hloubku výparové fronty na přírodních výchozech i na kvádrovém zdivu, kde jsem se snažil popsat chování výparové fronty.

Abstact

The vaporization plane in porous materials separates the capillary zone, the area where water moves in liquid state, from the dry surface layer where water moves in the form of vapor. The depth of the vaporization plane and its geometry is essential for a large number of physical, chemical and biological processes in porous materials that can, for example, cause material degradation and decay. Mostly, the vaporization plane is not measured directly, but water content or suction pressure measurements are used instead, which are, however, not suitable for the plane's detection. Therefore, there was a need for a method that would be able to determine the depth of the vaporization plane in holes of small diameter (<1 cm). To fulfill this aim, I used a needle onto which I applied glue and uranine. Upon insertion, uranine on the needle dissolves in the capillary zone and changes its color from red to green, while remaining red in the dry zone. The boundary between the red and green parts thus accurately displays the vaporization plane. With this newly developed method, I subsequently measured the depth of the vaporization plane on natural outcrops as well as on buildings, where I tried to describe the vaporization plane's behavior.

Obsah

1. Úvod a cíl práce	1
2. Teorie	2
2.1. Retenční křivka	2
2.2. Proudění vody v porézních materiálech	3
3. Rešerše literatury - metody určování hloubky výparové fronty	4
4. Studované lokality	9
4.1. Lokality v ČR	9
4.2. Lokality v Utahu, USA	19
5. Metodika	26
5.1. Materiály a přístroje	26
5.2. Experimenty	28
5.2.1. Experimenty za účelem vyvinutí metody lokalizované výparové fronty v úzkém otvoru	28
5.2.2. Experimenty týkající se využití nové metody pro určení výparové fronty	33
6. Výsledky a diskuse	34
6.1. Výsledky experimentů, týkající se vývoje nové metody	34
6.2. Výsledky experimentů, týkající se použití	50
7. Závěr	63
8. Seznam použité literatury	63
Příloha 1	68

1. Úvod a cíl práce

Voda v porézním prostředí má např. v pískovci zásadní vliv na jeho rozpad. A jelikož jsou porézní materiály v přírodě vystaveny různým zdrojům vlhkosti, jako jsou například srážky (Sass a Viles, 2010), podzemní nebo půdní voda (La Iglesia et al., 1997), je zde velké riziko poškození materiálu. Proudění vody v porézním prostředí a její výpar není jednotné, může být silně ovlivněno např. nehomogenitou materiálu, reliéfem povrchu, teplotou okolí (Hall a Hoff 2012) nebo biokrustou (Slavík et al., 2017). Hall et al. (2010) navíc popsali, že výpar podléhá denním a ročním variacím, což přispívá ke složitosti vlhkostních režimů. Vliv na výpar mají meteorologické děje, jako jsou srážky, teplota, sluneční svit, rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu (Franzen a Mirwald, 2004).

Kdekoliv se vyskytuje porézní voda, existuje riziko vniknutí kapilární vlhkosti do materiálu a srážení solí, které se přirozeně vyskytují v pórové vodě. To může způsobit rozvolňování povrchu a vytvářet zvětrávací formace jako voštiny a tafoni (Mol a Viles 2013). Rozpad probíhá nejčastěji na tzv. výparové frontě (McKinley a McCabe 2010), což je hranice mezi kapilární zónou, kde se voda pohybuje v kapalně formě, a suchou přípovrchovou zónou, kde je pohyb možný pouze ve formě vodní páry. Při dešti a vysoké vzdušné vlhkosti dochází k přiblížení výparové fronty k povrchu, při vysokých teplotách, slunečním osvětlení a proudění větru při povrchu pískovce dochází k ústupu výparové fronty do větších hloubek (Yamanaka a Yonetani, 1999). Navíc do nedávné doby nebyly metody, které by byly schopné najít kapilární vodu při povrchu a sledovat její pohyby v čase. Proto je znalost chování a tvaru výparové fronty zásadní předpoklad pro pochopení výparových procesů (Shokri a Or, 2011; Bruthans et al., 2018). Dále hraje výparová fronta významnou roli v zemědělství při plánování zavlažování (Idso et al. 1975), hydrologii (odtok a vsak) a meteorologii (záchyt tepla, desertifikace; Charney et al., 1977), neboť výpar je klíčový proces v přenosu vody mezi půdou a atmosférou. Výpar je důležitý z toho důvodu, že voda představuje zásadní degradační faktor, který zásadně snižuje životnost materiálů a umožňuje růst řas a plísní, které mohou mít negativní vliv na lidské zdraví (Viitanen et al., 2010). Proto je výpar předmětem zkoumání řady oborů, jako jsou přírodní vědy, inženýrské obory, endolitická biologie nebo studie na zvětrávání a rozpad budov a skal. Tím jsou ohroženy i historické budovy, u kterých může voda způsobit nenávratné poškození (Baker et al., 2006).

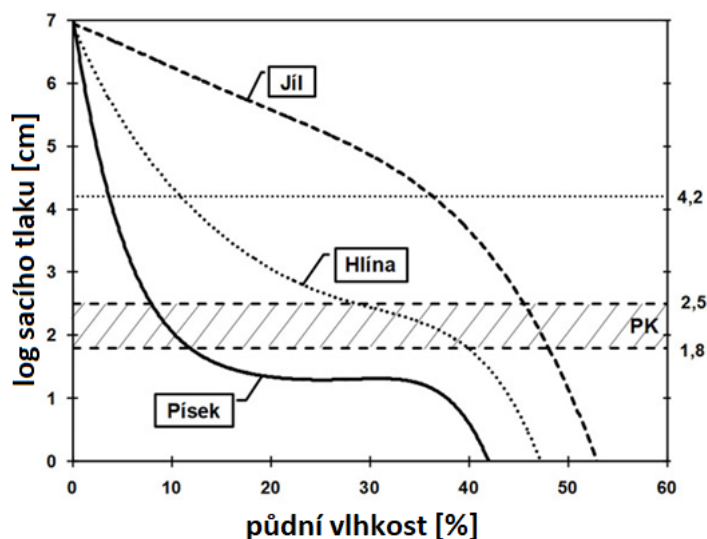
V současné době se výparová fronta určuje nepřímým měřením vlhkosti nebo vizualizací vodou rozpustným barvivem ve větším otvoru v porézním prostředí (Weiss et al., 2018a). Metody měřící vlhkost materiálu nejsou dostatečně přesné a zobrazení barvivem jde provádět pouze v otvorech o průměru minimálně 5 cm, což není možné používat na chráněných výchozech a kulturních památkách. Z tohoto důvodu jsem si za cíl své práce stanovil pokusit se vyvinout metodu, která by dokázala určit hloubku výparové fronty a která by zároveň minimálně zasahovala do přírodního prostředí. Pokud by byl tento krok úspěšný, chtěl bych na vybraných lokalitách studovat prostorovou distribuci kapilární a suché zóny při povrchu pískovce.

Nová metoda by měla vycházet z vizualizace výparové fronty barvivem, která by byla uzpůsobena tak, že půjde použít v otvorech o průměru $<0,5$ cm. Jako nosič barviva plánují použití tenké tyče (jehly), na které bude barvivo připevněno lepidlem.

2. Teorie

2.1. Retenční křivka

Retenční křivka je základní vztah popisující chování vlhkosti v nesaturovaném materiálu. Je to vztah mezi objemovou vlhkostí a zápornou tlakovou výškou - sacím tlakem (Vahedifard, 2018). Když je materiál nasycený, sací tlak je 0. Graf se většinou zobrazuje v semilogaritmickém měřítku (obr. 2.1). Na průběh retenční křivky má zásadní vliv zrnitost, mineralogické složení, obsah humusu, hustota a půdní struktura (Matoušková et al., 2013).



Obr. 2.1: Retenční křivka pro písek, hlínu a jíl (upraveno podle Jandáka et al., 2007)

Z retenční křivky můžeme zjistit několik bodů důležitých pro proudění vody. Je to saturovaná a reziduální vlhkost a vstupní hodnota vzduchu. Když jsou všechny póry zaplněny vodou, má materiál saturovanou vlhkost. Tato vlhkost trvá až do takového sacího tlaku, kdy dojde k proniknutí první vzduchové bubliny do materiálu. Tento bod se nazývá vstupní hodnota vzduchu. Zbývající vlhkost v materiálu, která již nejde ze vzorku odstranit zvyšováním sacího tlaku je reziduální vlhkost. Na retenční křivce jde ještě zobrazit polní kapacita, což je maximální množství vody, které je schopen daný materiál udržet aniž by byl drénován gravitačním prouděním (Jandák et al., 2007).

Retenční křivka má jiný tvar pro zvlhčování a jiný pro vysychání materiálu. Tomuto jevu se říká hystereze retenční křivky a je dána zejména uzavíráním vzduchových bublin ve slepých pórech a rozdílným smáčecím úhlem na povrchu zrn (Kutílek, 1984).

2.2. Proudění vody v porézních materiálech

Prostředí nad hladinou podzemní vody je označováno jako kapilární zóna. Je zde záporná hydraulická výška, voda proudí skrz částečně nasycené póry a její pohyb je řízen Richardsovou (1931) rovnicí.

$$v = -K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

kde K je hydraulická vodivost závislá na tlakové výšce (h) a $\frac{\partial h}{\partial x}$ je hydraulický gradient ve směru x . Z rovnice vyplývá, že voda proudí z místa nižšího sacího tlaku do vyššího. Rovnice (1) je odvozená z Darcyho rovnice s tím rozdílem, že K je závislé na tlakové výšce.

Když je dosaženo kritického sacího tlaku, při kterém dojde k fázové přeměně, voda se dále pohybuje difuzí ve formě vodní páry, která je popsána Fickovým zákonem.

$$q_v^i = -D_v \frac{dc_v}{dx} \quad (2)$$

kde D_v je difuzivita par a c_v koncentrace páry (Bittelli et al., 2008). Zóna, ve které se pohybuje voda pouze ve formě vodní páry, se nazývá suchá přívrchová zóna. V kapilární zóně naproti tomu voda proudí zejména ve formě kapalné vody, nicméně může proudit i ve formě vodní páry. Hranice mezi kapilární zónou (KZ) a suchou přívrchovou zónou (SPZ) se nazývá výparová fronta (VF; obr. 2.2; Idso et al., 1974; Hillel, 2004; Or et al., 2013).



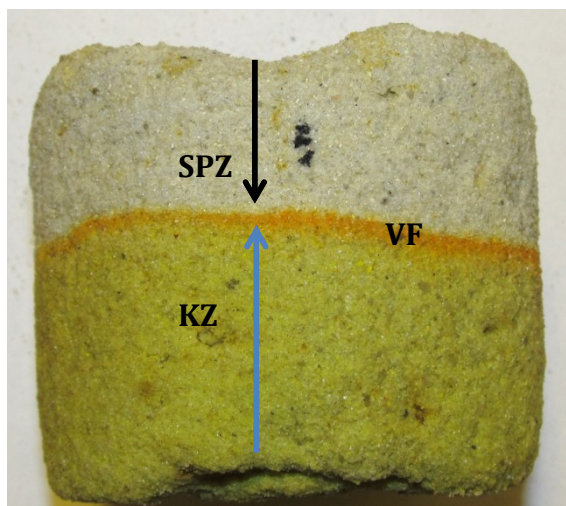
Obr. 2.2: Výparová fronta (červená), odděluje kapilární zónu (žlutá) od suché přívrchové zóny (bílá)

3. Rešerše literatury - metody určování hloubky výparové fronty

Výparová fronta může být určena několika přímými a nepřímými metodami. Přímé metody zobrazí výpadovou frontu, naproti tomu nepřímé metody odhalí pozici výparové fronty ze změny vlhkosti materiálu. U nepřímých metod je tedy třeba stanovit vlhkost v různých hloubkách pod povrchem s dostatečným prostorovým rozlišením, aby bylo možné identifikovat výpadovou frontu.

Vizualizace roztokem barviva

Při kontrolované simulaci proudění vody se dá výparová fronta na vzorku kompaktního porézního materiálu (např. pískovce) určit injektáží roztoku uraninu (1-5 g/l). Roztok v kapilární zóně má světle žlutou barvu, která na výparové frontě přechází do jasně oranžové (obr. 3.1), jelikož zde dochází k nakoncentrování a vysrážení uraninu. Tato metoda umožňuje sledovat chování výparové fronty v čase při snížení nebo zvýšení dotace vody (Weiss et al., 2018a; Shokri a Or, 2011)



Obr. 3.1: Vizualizace roztokem barviva (upraveno podle Weisse et al., 2018a)

Vizualizace barvivem v prášku

Tato metoda spočívá ve vyvrtání otvoru dostatečně velkého, aby bylo možné provést vizuální pozorování na stěnách otvoru. Následně se do otvoru nanese štětečkem práškový uranin a sleduje se, kde se mění barva. Hranice mezi oranžovou a červenou barvou uraninu je výparová fronta (Weiss et al., 2018a).

Gravimetrické měření

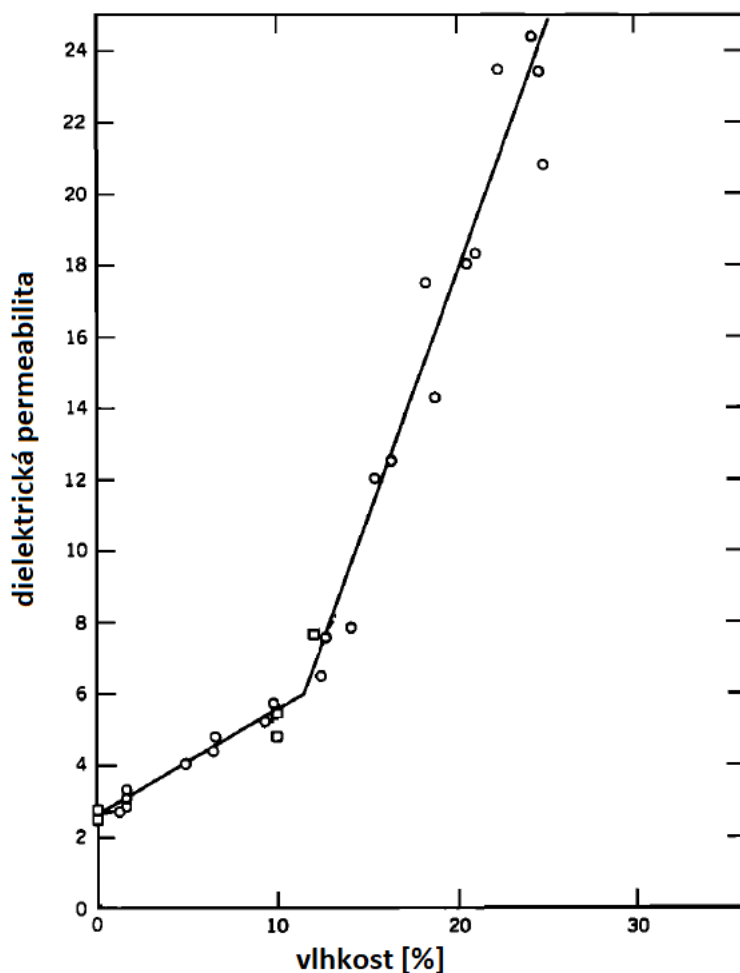
Nejčastější metodou pro laboratorní určování vlhkosti materiálu je gravimetrické měření. Tato metoda spočívá ve zvážení vzorku, jeho umístění do pece, kde se při 105 °C suší po dobu minimálně 24 hodin, dokud nebude dosaženo konstantní hmotnosti. Po vytažení se vzorek opět zváží a výsledná vlhkost se vypočítá z rovnice

$$\theta = \frac{m_w \rho_d}{m_d \rho_w} \quad (3)$$

kde θ je objemová vlhkost, m_w hmotnost vody, ρ_d hustota vysušeného vzorku, ρ_w hustota vody a m_d hmotnost suchého vzorku (Smugge et al., 1980).

Elektromagnetické metody

Elektromagnetické metody jsou veškeré techniky, které používají ke zjištění vlhkosti elektromagnetické vlastnosti materiálů. Dielektrická permeabilita přírodních porézních materiálů ϵ je téměř stejná jako volného vzduchu (1), ϵ v horninách se běžně pohybuje od 3 do 5, zato voda má okolo 80. Z toho plyne, že dielektrické vlastnosti závisí především na vlhkosti a i relativně malé množství přítomné vody výrazně ovlivní elektromagnetické vlastnosti.



Obr. 3.2: Graf závislosti dielektrické permeability na vlhkosti (upraveno podle Smugge et al., 1980)

Z grafu (obr. 3.2) je zřejmé, že při nižších vlhkostech je směrnice přímky menší, než při vyšších. Je to dáno tím, že voda nejprve obalí zrna a nevytvoří souvislé spojení jednotlivých

obalených zrn. Délka mírnějšího úseku směrnice přímký závisí na zrnitosti materiálu, kde u jemnozrnnějších je delší (Smugge et al., 1980).

Nejčastěji používaná elektromagnetická metoda je TDR (time domain reflectometry), která měří rychlost šíření signálu v prostředí mezi dvěma čidly v otvorech o průměru 0,5 cm. Tato metoda změří průměrnou hodnotu šíření signálu v celé délce čidel a z ní se pomocí Toppovy rovnice (4) vypočítá dielektrická permitivita a z ní vlhkost. Přesnost měření je 3 % (Pavlík et al., 2007).

$$\theta = (-530 + 292\varepsilon - 5,5\varepsilon^2 + 0,043\varepsilon^3) * 10^{-4} \quad (4)$$

Odporové metody

Odporové metody spočívají v pouštění elektrického proudu do prostředí a měření jeho odporu, který je nepřímo závislý na vlhkosti (Mol a Viles 2013). Odporové měření může být prováděno lokálně – protimetrem nebo v řezu – elektrodami, které se vyhodnocují elektrickou rezistivní tomografií (ERT). V současné době odporové metody umožňují vizualizaci vlhkostních režimů (od hloubek jednotek centimetrů do desítek metrů) bez potřeby invazivních sond. Jejich nevýhodou je nižší přesnost a ovlivňování jinými faktory než je vlhkost, jako jsou rozpuštěné sole, které výrazně snižují odpor oproti roztokům o nízké mineralizaci (Mol a Viles, 2010).

Tenzometrické metody

Tenzometrické metody měří sací tlak v otvoru o minimálním průměru 0,6 cm pomocí přístroje sestávajícího z keramické čepičky s vysokou vstupní hodnotou vzduchu, která je napojena na trubici a manometr nebo vakuový indikátor. Celá soustava je vyplněna kapalinou, většinou vodou, ale v chladnějších oblastech může být použit i etylenglykol (McKim et al., 1976). Na konci celé sestavy je přijímač s displejem, který ukazuje aktuální hodnoty sacího tlaku v místě keramické čepičky.

Tepelný pulz

Tato metoda spočívá ve vyslání tepla a měření odpovědi prostředí. Čidlo na měření tepelného pulzu se obvykle sestává ze dvou nebo tří jehlic (Kamai et al., 2008). Jedna slouží k vyslání tepelného pulzu a zbývající k měření teploty. Z naměřených hodnot se vypočítají termální vlastnosti daného materiálu (Trautz et al., 2014). Tyto data se dále použijí k vypočtení tepelného toku a objemové tepelné kapacity C . Objemová tepelná kapacita vody je mnohem vyšší než suchého materiálu. Aby bylo možné určit vlhkost, tak je důležité provést kalibraci pro daný materiál, abychom zjistili objemovou tepelnou kapacitu suchého materiálu. Pokud známe objemovou tepelnou kapacitu suchého materiálu, tak ji můžeme dosadit spolu se změřenou objemovou tepelnou kapacitou do rovnice

$$\theta = (C - C_s(1 - \phi))/C_w \quad (5)$$

kde C_w je objemová tepelná kapacita vody, C_s je objemová tepelná kapacita suchého materiálu, ϕ porozita a θ vlhkost (Kamai et al., 2008).

Neutronová metoda

Tato metoda určuje vlhkost z měření termálních nebo pomalých neutronů. Neutrony s vyšší energií (milion eV a víc) jsou emitovány do půdy a zpomalovány elastickou kolizí s jádry atomů a při tom se zahřívají. Průměrná ztráta energie je větší při kolizi s atomy s menší atomovou hmotností (což je většinou vodík) než při kolizi s větší hmotností, takže vodík zpomaluje mnohem více než všechny ostatní atomy. Hustota výsledného mraku zpomalených neutronů je funkcí vlhkosti v plynné, kapalně i pevné fázi. Měří se počet zpomalených neutronů za čas a z kalibrační křivky se zjistí vlhkost. Jako zdroj se nejčastěji používá americium-berylíový zdroj (Bell a McCulloch, 1966), který eliminuje gama záření a je lehčí a přesnější než starší radium-berylíový zdroj.

Kalibrace závisí na podmínkách experimentu, zda se jedná o laboratorní nebo přírodní podmínky, a musí se provádět speciálně pro každý materiál. Terénní kalibrace je náročná a výsledné hodnoty jsou ještě ovlivněny chodem přístroje, a tak se musí po určité době znovu kalibrovat (Churayev a Rode, 1966).

Záchyt gama paprsků

Tato metoda slouží k určení vlhkosti v tenké vrstvě. Tato metoda je založena na měření hustoty. Předpokládá se, že hustota suchého materiálu je konstantní a změna hustoty je dána změnou vlhkosti. Záření vychází ze zdroje, prochází vzorkem a je měřeno v přijímači. Přijímač je tvořen scintilačním počítačem a gama spektrometrem. Chyba měření se pohybuje do 1 % (Smugge et al., 1980; Shahidzadeh-Bonn et al., 2007).

Rentgen

Zařízení se skládá ze zdroje rentgenových paprsků (produkujících energie fotonů až 70 keV) a kadmium-zinek-tellurového detektoru s rozlišením ≤ 1 mm. Vzorek se umístí mezi zdroj rentgenového paprsku a detektor, připojený ke speciálnímu PC se softwarem umožňují zcela samostatné měření, sběr a zpracování dat. PC zároveň kontroluje přesnou pozici, teplotu a vlhkost v komoře. Tato metoda měří atenuaci záření, ze které se vypočítá vlhkost (Baker et al., 2006). Chyba měření je přibližně 1 % (Coles et al., 1998).

Tabulka 3.1: Výhody a nevýhody přímých a nepřímých metod pro určování hloubky výparové fronty

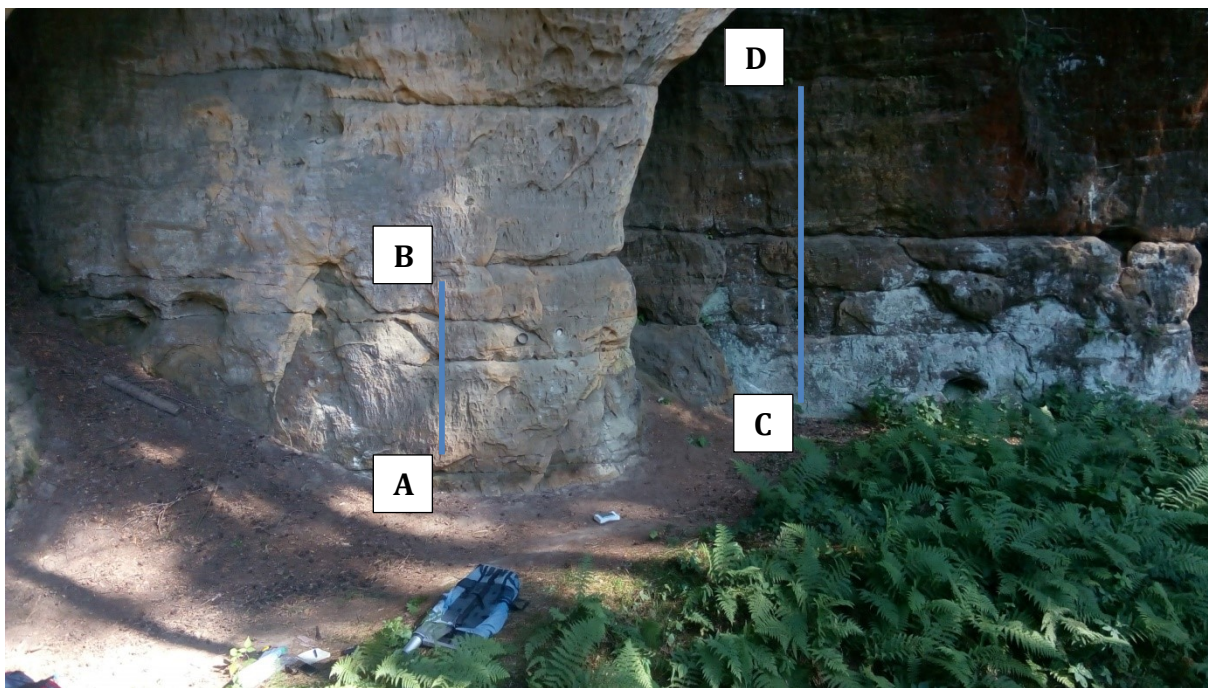
	výhody	nevýhody
Vizualizace roztokem barviva	přesné zobrazení výparové fronty	dlouhá doba experimentu; ovlivnění hydraulického pole
Vizualizace barvivem v prášku	přesné zobrazení výparové fronty	destruktivní (otvor v řádu cm)
Gravimetrická metoda	ekonomická dostupnost; jednoduchá; přesná	potřeba reprezentativního vzorku; destruktivní
Elektromagnetické metody	s kalibrací jsme schopni určit přesnou hodnotu vlhkosti; sondy můžou být umístěny do různých hloubek a lze tak pomocí nich určit vlhkostní profil; existuje široká škála velikostí senzorů	vysoká cena
Odporové metody	jednoduchý systém a měření; nedestruktivní	vliv koncentrace iontů v prostředí na vodivost
Tenzometrické metody	jednoduchý systém a měření; aktuální informace o vlhkosti; možnost měření po dlouhý časový interval; možnost měření i v saturované zóně	Tenzometry měří sací tlak, ale ne vlhkost. Ta se musí dopočítat z vlastností daného materiálu; sondy jsou křehké; rozsah měření je od 0 do 800 cm vodního sloupce, sací tlaky v prostředí bývají často vyšší
Tepelný pulz	Jednoduchý systém a měření, s kalibrací přesná hodnota vlhkosti	Rozpětí a délka jehlic; přesné umístění do požadované hloubky
Neutronová metoda	nezáleží na fázi vlhkosti; může být sledován vlhkostní profil v hloubce; zařízení umožňuje automatický záznam, což umožňuje monitoring v čase	Špatné hloubkové rozlišení; nutné speciální oprávnění pro převoz a operaci se zářiči; drahé a náročné přístroje
Záchyt gama paprsků	měření v tenkých vrstvách; nedestruktivní;	Špatné prostorové rozlišení; nutné speciální oprávnění pro převoz a operaci se zářiči; drahé a náročné přístroje
Rentgen	Rychlé a precizní měření 2D distribuce vlhkosti ve vzorcích dostatečně velkých, aby reprezentovaly makroskopické vlastnosti; velmi vysoké prostorové rozlišení; měření více vzorků zároveň	Drahé zařízení; zdroj ionizujícího záření; destruktivní metoda

4. Studované lokality

4.1. Lokality v ČR

Mladějov 1

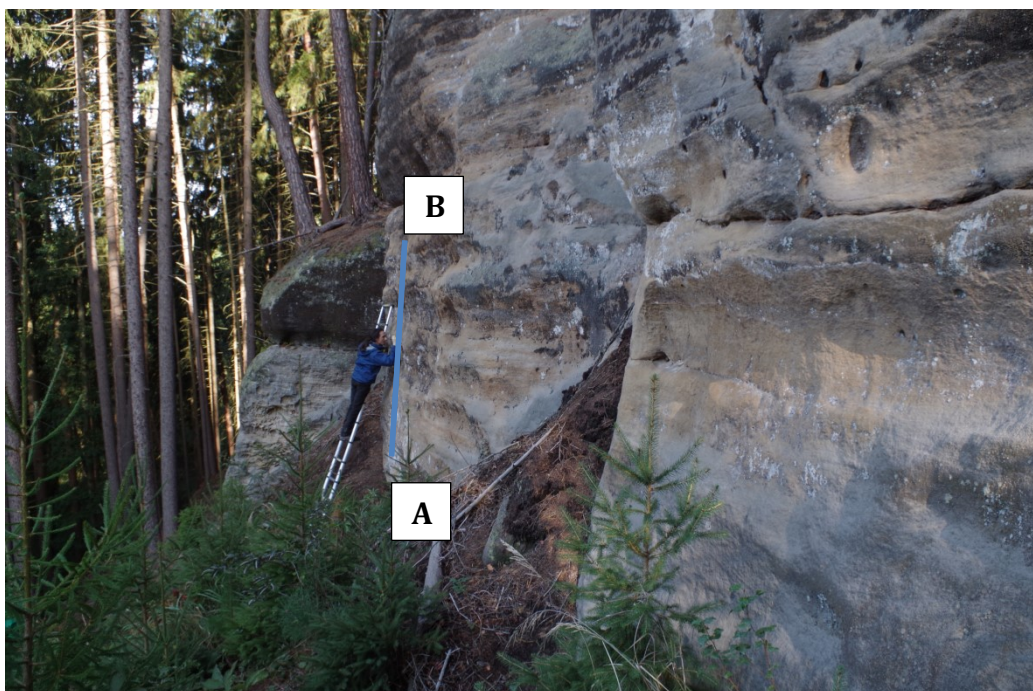
Lokalita se nachází v Českém ráji 500 metrů severně od obce Mladějov. Lokalita je tvořena drobnými skalními výchozy, kde vychází křemenný pískovec turonského až coniackého stáří teplického souvrství (Uličný, 2001). Lokalita Mladějov 1 leží v lese, výchoz je orientován na jih a je tvořen pilířem, který je hydraulicky částečně oddělený od okolního masivu (obr. 4.1). Jiná část skály je pokrytá biokrustou (Slavík et al., 2017) a na další části jsou vidět vysrážené sole. Z vlastního měření teploty jsem zjistil, že průměrná roční teplota je 11,5 °C a průměrný roční úhrn srážek je 590 mm/rok (Nadrchal a Smutek, 2007). Na lokalitě Mladějov 1 jsem vyvrtal dva vertikální profily hloubky výparové fronty, jeden na pilíři (A – B) s výškou 110 cm a druhý na stěně za pilířem (C – D) o výšce 400 cm.



Obr. 4.1: Lokalita Mladějov 1

Mladějov 2

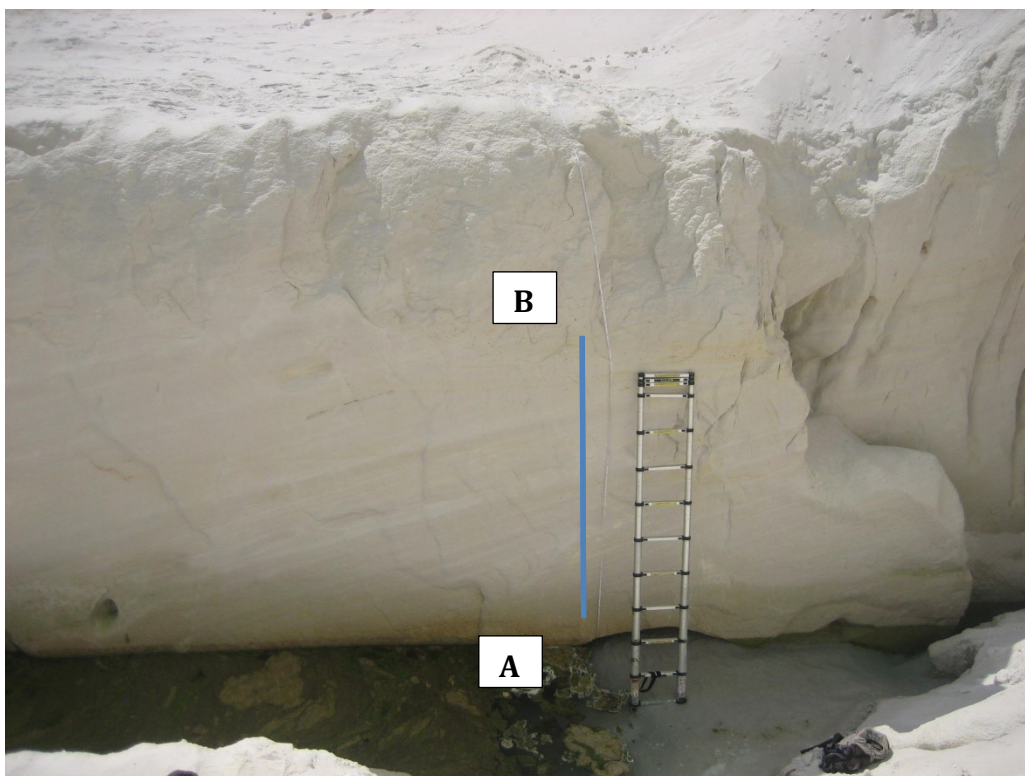
Mladějov 2 (obr. 4.2) je jihozápadní skalní stěna, vzdálená 800 metrů západně od lokality Mladějov 1, tvořená stejnými horninami, která je vystavena přímému slunečnímu záření. Na lokalitě se nacházejí voštiny. Průměrná roční teplota je 11,5 °C a průměrný roční úhrn srážek je 590 mm/rok (Nadrchal a Smutek, 2007). Na lokalitě Mladějov 2 jsem vyvrtal 9 otvorů v profilu A – B vysokém 350 cm a z nich zobrazil profil hloubky výparové fronty.



Obr. 4.2.: Lokalita Mladějov 2 (foto M. Slavík)

Lom Střeleč

Lom se nachází 100 metrů severně od lokality Mladějov. Těží se zde převážně písek pro sklářské využití. Jedná se o tzv. zamčený písek (Bruthans et al. 2014) tvořený z 98 % křemennými zrny a 2 % kaolinem (Hauser et al., 1965) svrchnoturonského až coniacského stáří teplického souvrství (Uličný, 2001). Průměrná roční teplota je 11,5 °C a průměrný roční úhrn srážek je 590 mm/rok (Nadrchal a Smutek, 2007). Na této lokalitě jsem si vybral hladkou puklinovou vertikální stěnu, která vycházela přímo z jezírka na dně lomu, a kde se eliminuje vliv reliéfu skalní stěny na hloubku výparové fronty (obr. 4.3). Profil sahal od hladiny jezírka do výšky 300 cm (A–B).



Obr. 4.3: Profil Střeleč

Malobratřice

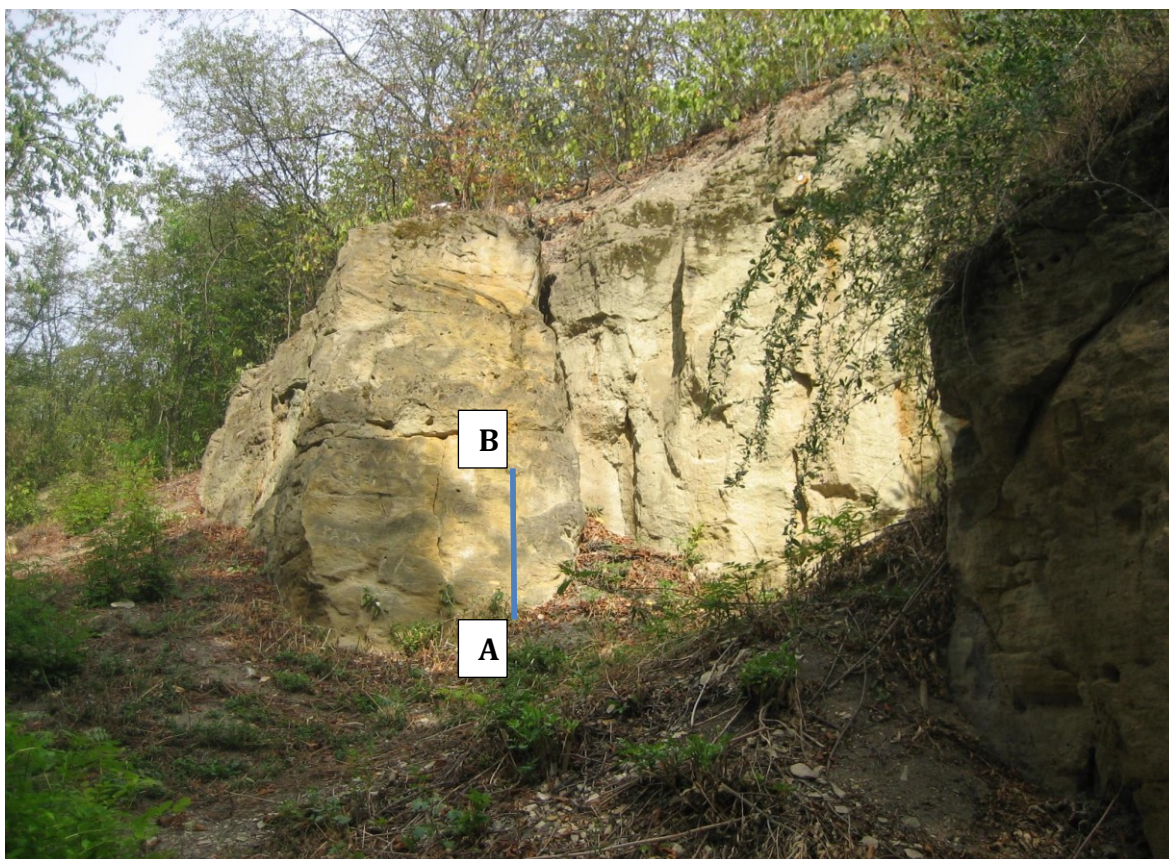
V lese 400 metrů severně od obce Malobratřice se nachází západně orientované skalní výchozy hrubozrnného křemenného pískovce až slepence svrchnoturonského až coniackého stáří (Slavík, 2014). Průměrná roční teplota je 11,5 °C a průměrný roční úhrn srážek je 590 mm/rok (Nadrchal a Smutek, 2007).

Prosek

V přírodní památce Prosecké skály v Praze – Libni se nachází výchozy masivních perucko-korycanských kvádrových pískovců cenomanského stáří (Králík, 1984). Jedná se o tři lokality s různou ochranou před deštěm. První lokalita je převis, který je zcela krytý před deštěm i slunečním svitem (obr. 4.4). Druhá lokalita je jihovýchodní stěna, která je přímo exponovaná na slunci a dešti (obr. 4.5). Třetí lokalita je západní stěna, která je krytá stromy před sluncem, po které může stékat napršená voda (obr. 4.6). Průměrná roční teplota podle dostupných dat Českého hydrometeorologického ústavu je 10 °C a průměrné roční srážky 511 mm. Na každé lokalitě jsem vyvrtal jeden profil (A–B).



Obr 4.4: Prosek - Lokalita 1



Obr 4.5: Prosek – Lokalita 2



Obr 4.6: Prosek – Lokalita 3

Kralupy

Lokalita se nachází u Dvořákovy stezky mezi Kralupy nad Vltavou a Nelahozevsi. Vystupují zde karbonské arkózy nýřanských vrstev kladenského souvrství (Chlupáč, 1999) s výraznými stopy kavernózního zvětrávání včetně tafoni. Já jsem měřil na jihovýchodní stěně v lese bez výskytu tafoni. Průměrná roční teplota podle dostupných dat Českého hydrometeorologického ústavu je 10 °C a průměrné roční srážky 511 mm.

Radotín

Lokality se nacházejí v katastrálním území městské části Praha-Radotín. První lokalita je drobný výchoz ordovického prachovce letenského souvrství v lese v úbočí vrchu Klapice. Druhá lokalita je opuštěný, zalesněný lom v údolí Šachetského potoka. V jihozápadní lomové stěně dochází ke střídání masivnějších deskových vápenců s vápencovými břidlicemi radotínských vápenců stupně Lochkov. Z veřejně dostupných dat Českého hydrometeorologického ústavu je průměrná roční teplota 10 °C a průměrné roční srážky 511 mm.

Pískovna Nový Dvůr

Lokalita se nachází 1 km jihozápadně od obce Nový Dvůr u Zdíkova na Šumavě. Nejdříve lom na křemen, později pískovna, má kruhový tvar o průměru 100 metrů a hloubku 40 metrů. V současné době je z poloviny zatopená. „Písek“ (eluvium žuly) je tvořen zvětralou žulou

s příměsí jílových minerálů. Na nedaleké meteorologické stanici Churáňov je průměrná roční teplota 5 °C a průměrný roční úhrn srážek 1030 mm.

Nové Hobzí

Obec Nové Hobzí, část obce Staré Hobzí leží na jihozápadní Moravě deset kilometrů východně od Slavonic. V rozpadlém stavení, které dříve sloužilo pravděpodobně jako zemědělská usedlost, zůstal stát cihlový sloup o rozměrech 1×1×10 m, ve kterém probíhalo měření hloubky výparové fronty. Sloup vybíhá z udusané hlíny a je zastřešený, takže je krytý před deštěm a dopadem slunečních paprsků. Ve sloupu jsem vyvrtal tři otvory. První ve výšce 50 cm, druhý 120 cm a třetí 150 cm nad zemí. Všechny otvory byly vyvrtány v polorozpadlých cihlách, které byly propadlé vůči svislému povrchu, protože v nerozpadlých cihlách nešlo vrtat.

Brandov

Obec v Krušných horách na hranici s Německem u města Olbernhau. V troskách stavení, kde zůstaly pouze obvodové cihlové stěny, na kterých rostou stromy, jsem měřil hloubku výparové fronty ve 2 profilech ve dvou protilehlých stěnách vysokých 1,5 m. První stěna směřuje na severovýchod, druhá na jihozápad. Stěny nejsou nijak kryty před deštěm a sluncem. Mezi stěnami se již vytvořila vrstva půdy, ve které rostou třímetrové stromy (obr. 4.7). Obě stěny jsou i na svém horním okraji pokryté vrstvou půdy, ale na první stěně je stěna odizolovaná od této vrstvy půdy vlnitým plechem. V první stěně jsem vyvrtal 5 otvorů a ve druhé 6.



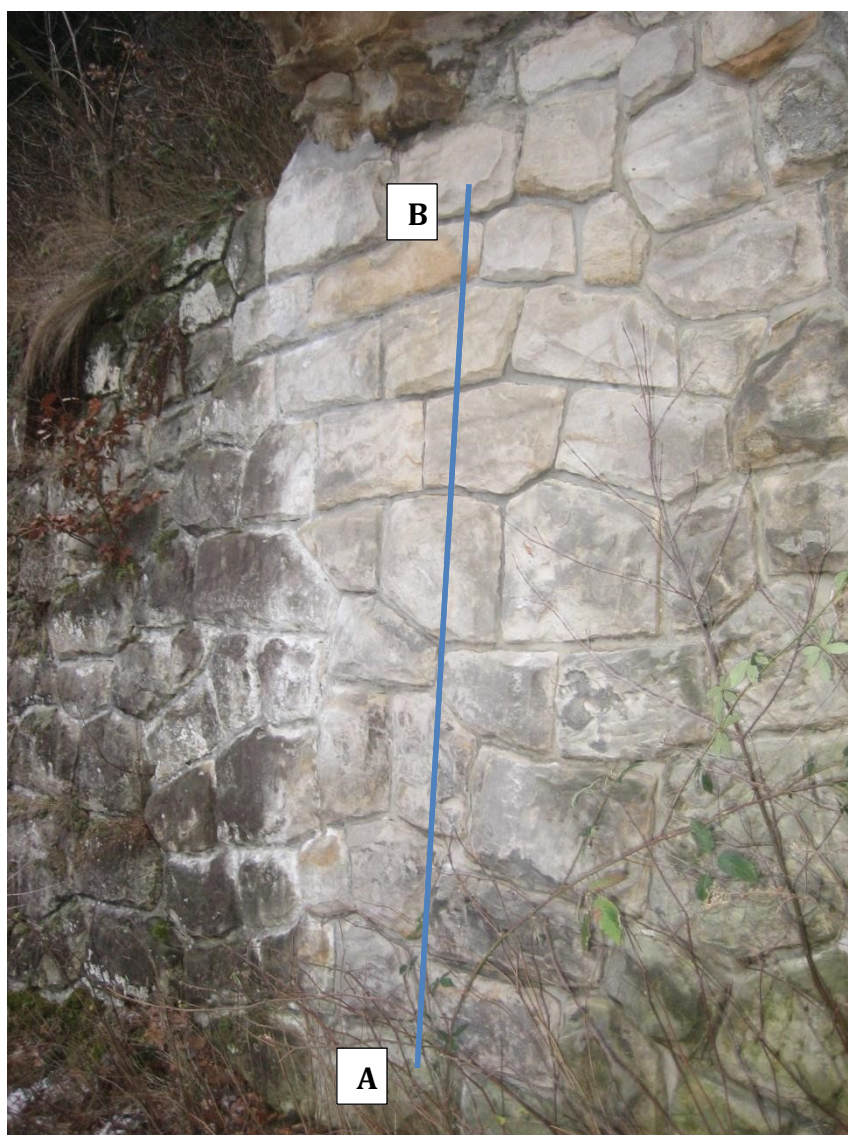
Obr. 4.7: Brandov profil 1

Hřebečníky

Stěna polorozpadlého zemědělského stavení tvořená z cca 60 % kambrickými křemennými slepenci, 30 % cihlami a 10 % skryjskými břidlicemi kambrického stáří. V některých místech je spojovací malta vydrolená. Stěna je 4 metry vysoká, orientovaná na jih, nechráněná před sluncem a deštěm. Ve stěně jsem měřil hloubku výparové fronty, abych zjistil, zda různé litologie ovlivňují průběh vlhkosti. Zajímalo mě, jestli je v různých stavebních materiálech výparová fronta v různých hloubkách a jaký je vliv pojivové malty. Z toho důvodu jsem vyvrtal tři otvory v cihle v maltě, jeden do břidlice v maltě, jeden do cihly neobklopené maltou, jeden do břidlice neobklopené maltou a dva do samotné malty.

Stěna z kvádrů u Pekařovy brány

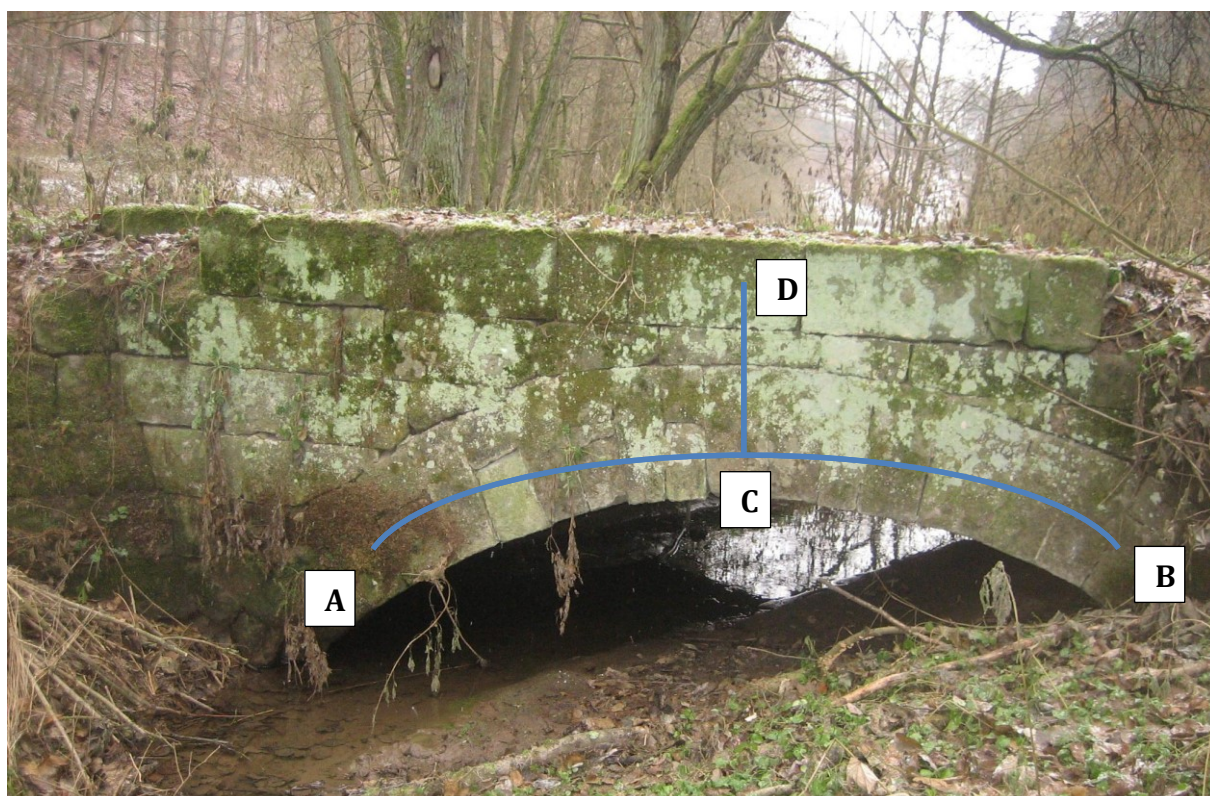
Uměle vytvořená stěna z pískovcových kvádrů pod silnicí z Libošovic do Vyskeře pod Pekařovou branou (obr. 4.8). Některé z kvádrů byly vystrčené více z malty než ostatní, jiné zase zapadlé oproti ideálnímu povrchu stěny. Celá stěna, tvořena místními kvádrovými pískovci, je orientovaná na západ a vystupuje nad mýtinou, tudíž není kryta před deštěm a slunečním zářením. Ve stěně jsem vyvrtal 4 otvory (A–B). První otvor ve výšce 17 centimetrů od země, druhý v 50 cm, třetí v 110 cm a čtvrtý v 175 cm od země.



Obr. 4.8: Stěna pod Pekařovou bránou

Most v Prokopském údolí

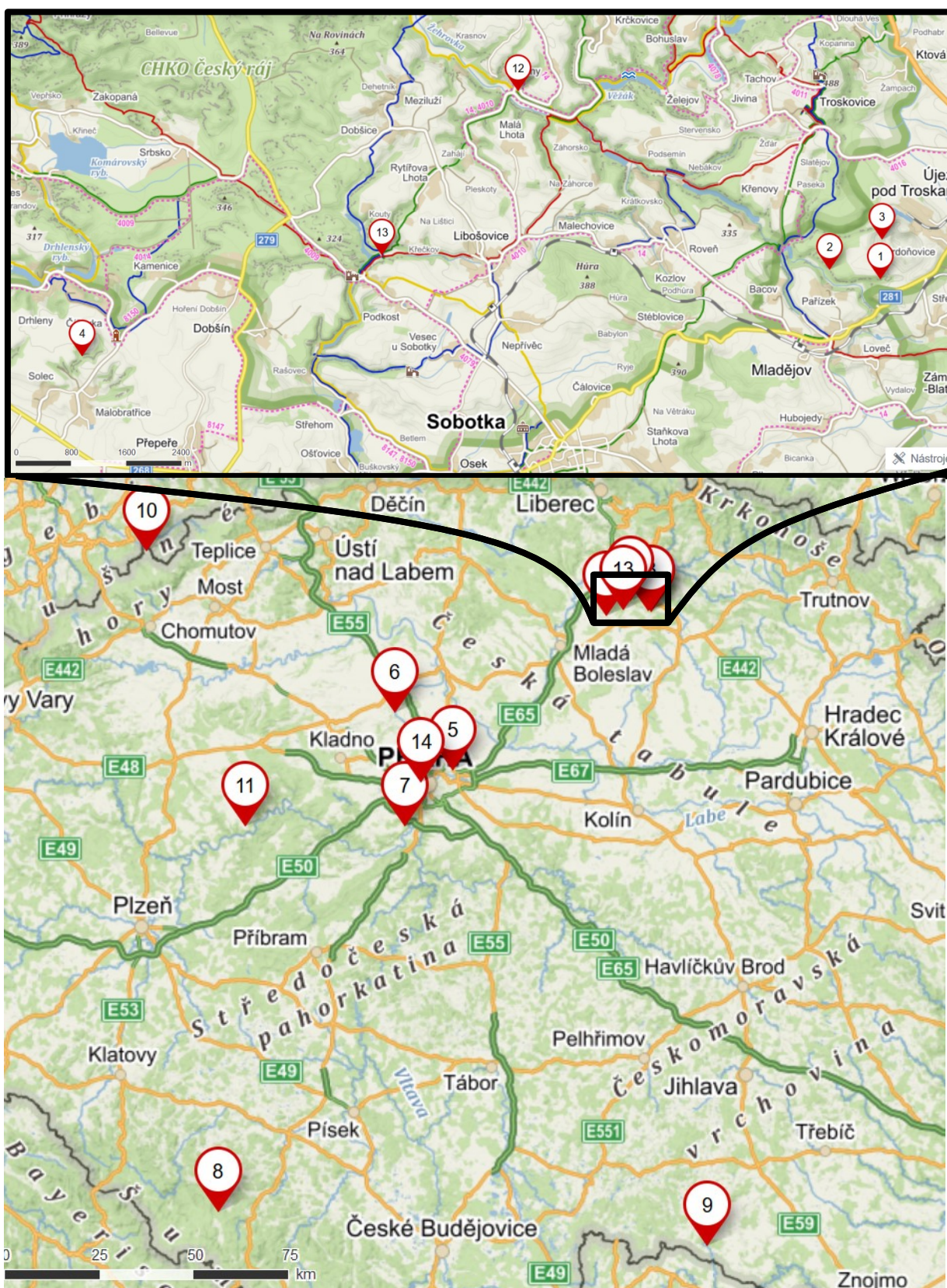
Mostek z pískovcových kvádrů, nacházející se nedaleko hradu Kost, byl postaven pravděpodobně v polovině 19. století (obr. 4.9). Materiál na stavbu mostu, křemenný pískovec turonského stáří, byl dovezen z lomu v Hořicích (Novotný, ústní sdělení, obyvatel Libošovic). Mostek leží v lese a jeden jeho oblouk vychází přímo z povrchového toku pod ním. V mostku jsem vyvrtal otvory podél oblouku, abych zjistil, zda se vlhkost v kamenném zdivu mostku šíří spíše z povrchového toku nebo shora ze srážkové vody. Podél oblouku jsem ve vzdálenosti vyvrtal 9 otvorů (A–B) a v nejužším místě tři otvory vertikálně (C–D). V okolí byly zbytky sněhu z předchozího dne, kdy sněžilo.



Obr.4.9: Most v Prokopském údolí

Pražský hrad

V Praze, na Pražském hradě, pod ochranou železobetonovou deskou přímo pod jihozápadní částí III. nádvoří Pražského hradu se, v těsné blízkosti románského kostela svatého Bartoloměje z 10. století, nacházejí zbytky barokní zdi, pravděpodobně části mostu, kde jsem měřil hloubku výparové fronty v pěti otvorech hlubokých 8–11 cm. Ve výšce 30 až 180 cm nad antropogenní jílovou půdou. Přímo pod stěnou byl umístěn vrt, kde byla zastižena hladina podzemní vody v hloubce 15 cm pod povrchem.



Obr. 4.10: Lokality v České republice (mapy.cz)

Tabulka 4.1: GPS souřadnice lokalit v České republice

č.	lokality	N	E
1	Mladějov 1	50,4897	15,2430
2	Mladějov 2	50,4909	15,2326

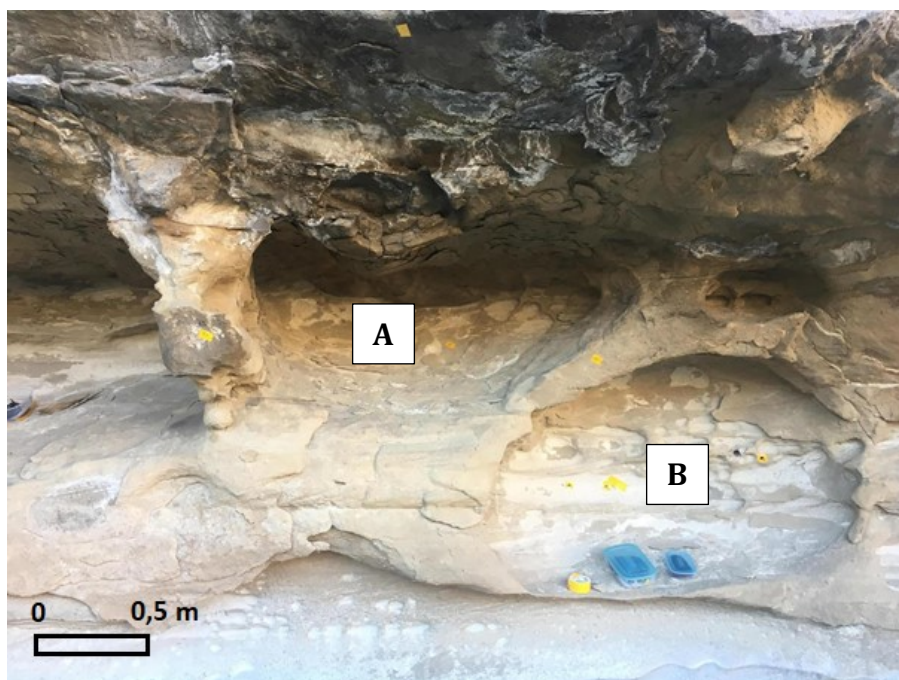
3	Lom Střeleč	50,4949	15,2433
4	Malobratřice	50,4797	15,0794
5	Prosek	50,1167	14,4884
6	Kralupy	50,2539	14,3016
7	Radotín	49,9863	14,3398
8	Pískovna Nový Dvůr	49,0653	13,6534
9	Nové Hobzí	48,9844	15,4503
10	Brandov	50,6317	13,3909
11	Hřebečníky	49,9844	13,7530
12	Stěna z kvádrů u Pekařovy brány	50,5142	15,1687
13	most v Prokopském údolí	50,4928	15,1408
14	Pražský hrad	50,0901	14,4003

4.2. Lokality v Utahu, USA

Lokality v Utahu byly vybrány jako příklad aridního klimatu. Měření probíhalo v říjnu 2018, kdy ovšem bylo extrémní vlhko s abnormálními srážkami, tím pádem ke zvýšené dotaci srážkové vody v přípovrchové zóně.

Helper 1

Lokalita se nachází u silnice ze Springville do Price poblíž obce Helper v Utahu v USA. Leží ve východní části Wasach plateau a nachází se zde svrchnokřídové pískovce souvrství castlegate (Hintze, 1988). Vyskytují se zde v hojné míře tafoni (obr. 4.11). Tafoni mají východní orientaci a jsou osluněné. Průměrná roční teplota je 8 °C a průměrný roční úhrn srážek 550 mm.



Obr. 4.11: Tafoni na lokalitě Helper 1

Helper 2

Lokalita se nachází asi 250 metrů jihozápadně od lokality Helper 1 a tvoří ji stěna po odtrženém tafone, kde začínají vznikat nové malé tafoni (obr. 4.12).



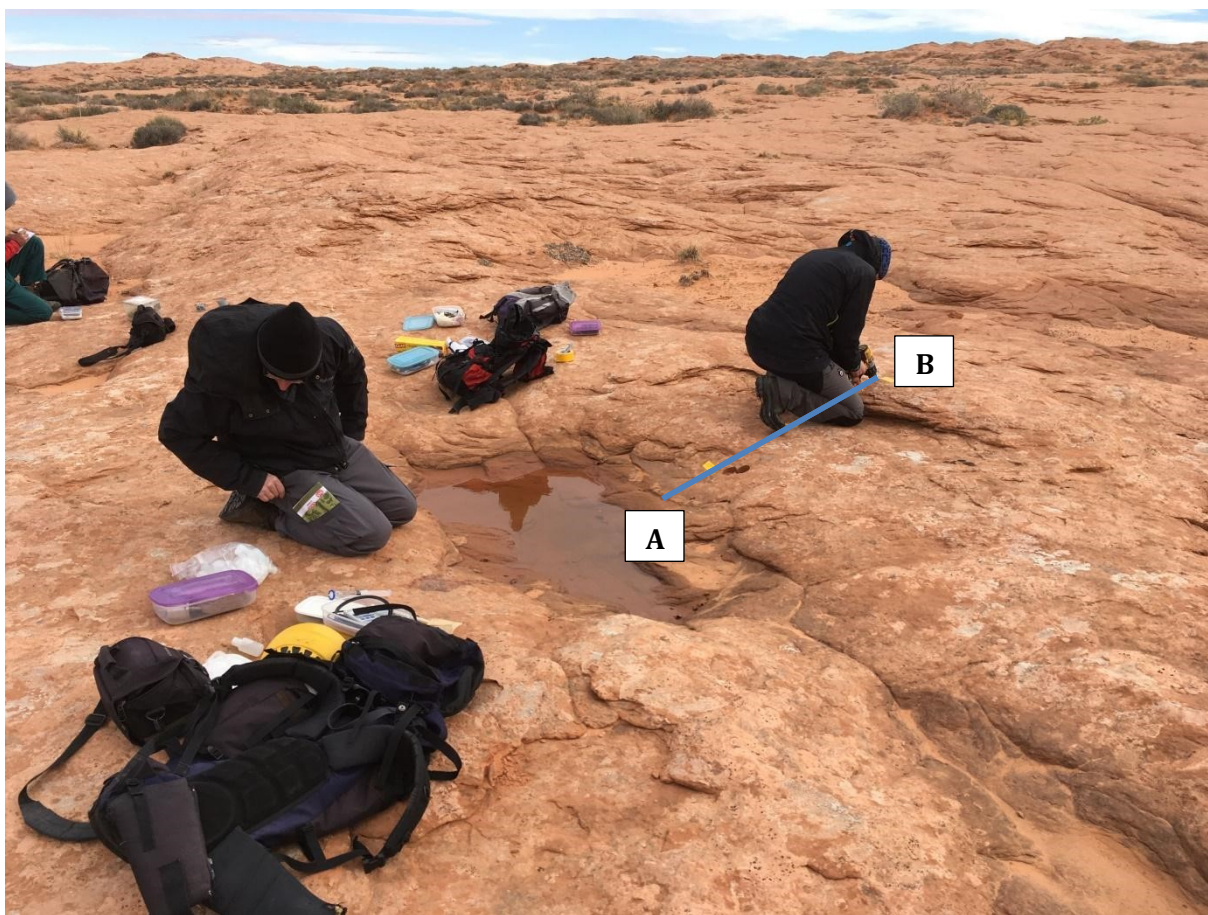
Obr. 4.12: Stěna po odtrženém tafone na lokalitě Helper 2

Helper 3

Lokalitu tvoří stěna, která se nachází v zářezu u silnice, 200 metrů severovýchodně od lokality Helper 1. Viditelně zde dochází ke střídání vrstev o různé zrnitosti, asi 30 cm mocných. Některé vrstvy mají na povrchu vysrážené sole (poloha solí), z čehož je zřejmé, že zde v některých časech byla výparová fronta na povrchu. Chtěl jsem zjistit, zda je rozdíl v hloubce výparové fronty ve vrstvách se solemi a bez nich.

Moqui Canyon 1

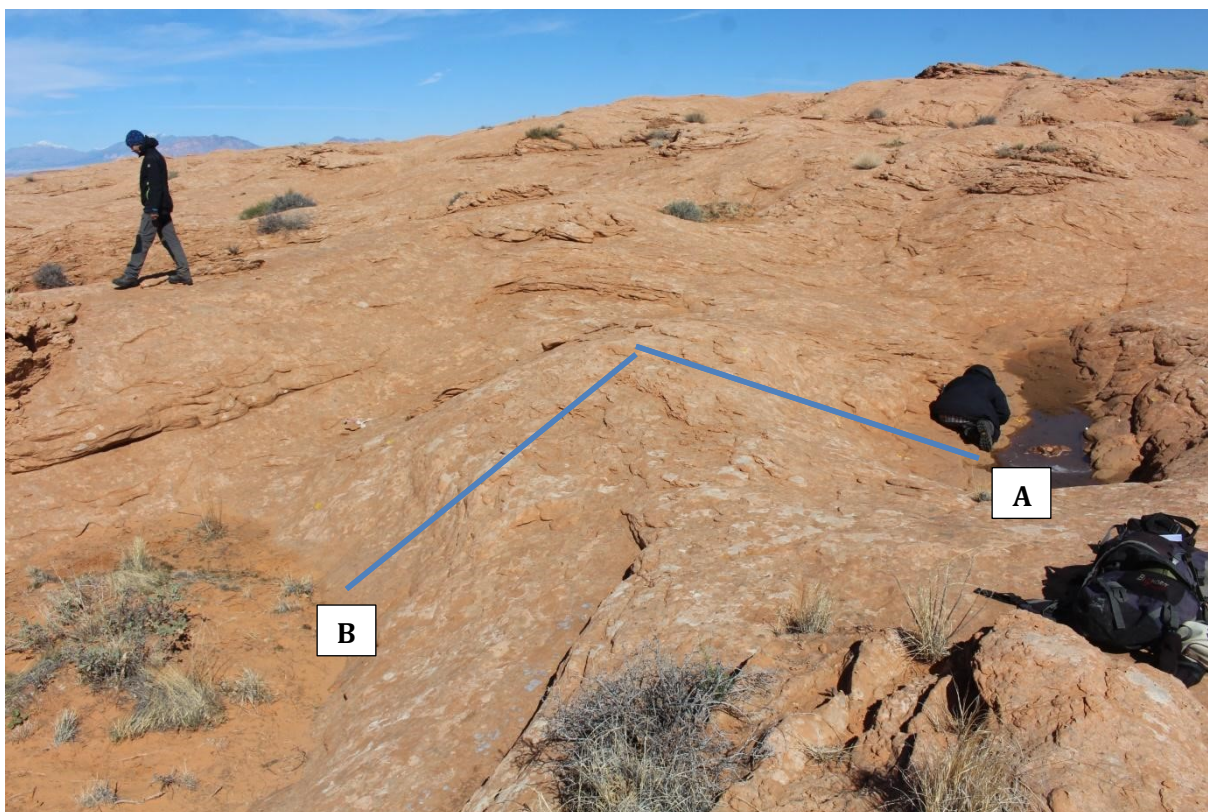
Lokalitu tvoří zvlněná plošina u Moqui Canyonu, kde se vyskytují skalní mísy, které jsou po deštích zaplavené. Hornina na lokalitě je pískovec jurského stáří souvrství navajo. Lokalita leží v poušti, tudíž zde není téměř žádná vegetace a půda. Průměrné roční srážky jsou <200 mm a průměrná roční teplota 15 °C. V Moqui Canyonu 1 jsem měřil hloubku výparové fronty v profilu, který vedl z mísy s vodou na skalní hřbet (obr. 4.13).



Obr.4.13: Moqui canyon 1 - profil ze zaplavené skalní mísy

Moqui Canyon 2

Lokalita se nachází asi 600 metrů severozápadně od lokality Moqui Canyon 1 ve stejné litologii. Lokalita je tvořena skalními mísami, z nichž jedna je zatopena vodou a druhá je suchá. Já jsem vedl profil ze skalní mísy s vodou, přes hřbet do skalní mísy bez vody (obr. 4.14).



Obr. 4.14: Moqui canyon 2 – profil ze zaplavené kaluže přes hřbet do suché mísy

Moqui Canyon 3

Lokalitu tvoří skalní převis o délce cca 60 metrů a hloubce 15 metrů, který uzavírá hluboký kaňon (obr. 4.15). Převis se nachází na bázi souvrství navajo, v jeho podloží leží 100 m mocná vrstva pískovců, prachovců a břidlic souvrství kayenta jurského stáří.



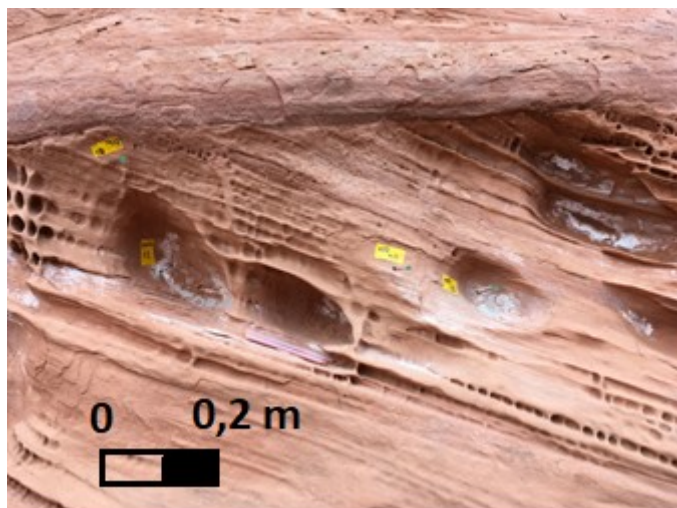
Obr. 4.15: Moqui Canyon 3

Moqui Canyon 4

Lokalitu tvoří skalní převis o rozměrech 100×20 metrů nacházející se v Moqui Canyonu. Materiál převisu je pískovec permského stáří souvrství wingate.

Moqui Canyon 5

Lokalita se nachází v Moqui Canyonu v souvrství Wingate ve stěně u občasného toku. Na lokalitě se vyskytují voštiny o velikostech 1–20 cm (obr. 4.16).



Obr. 4.16: Voštiny v Moqui canyonu 5

Crystal peak

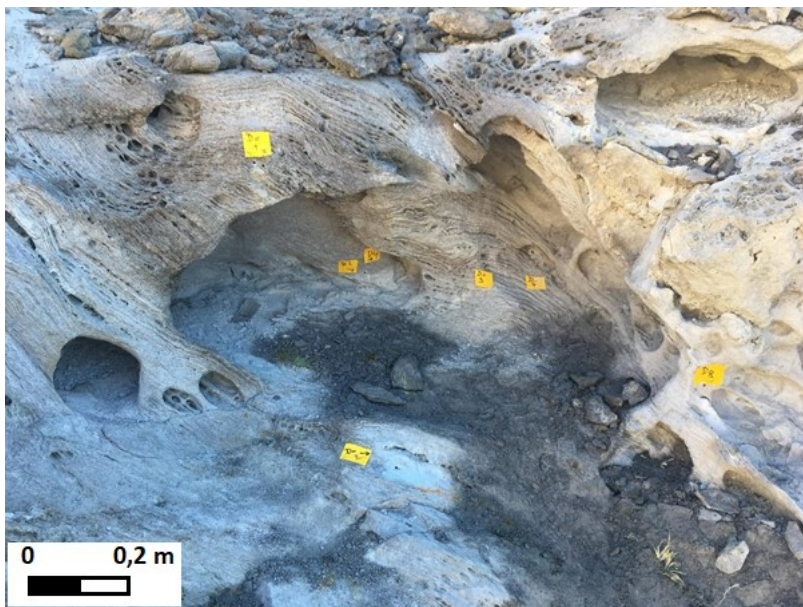
Výrazný vrchol na západě Utahu v oblasti Basin and Range je erozní zbytek oligocenní erupce. V podloží se nachází kambrické břidlice, vápence a křemence. V ryolitových tufech se hojně nachází tafoni (obr. 4.17), které se aktivně tvoří a pokrývají 50 % povrchu hory (McBride a Picard, 2000). Lokalita se nachází v aridním klimatu, průměrná roční teplota je 12 °C a průměrné roční srážky 150 mm (Dunn, 1959).



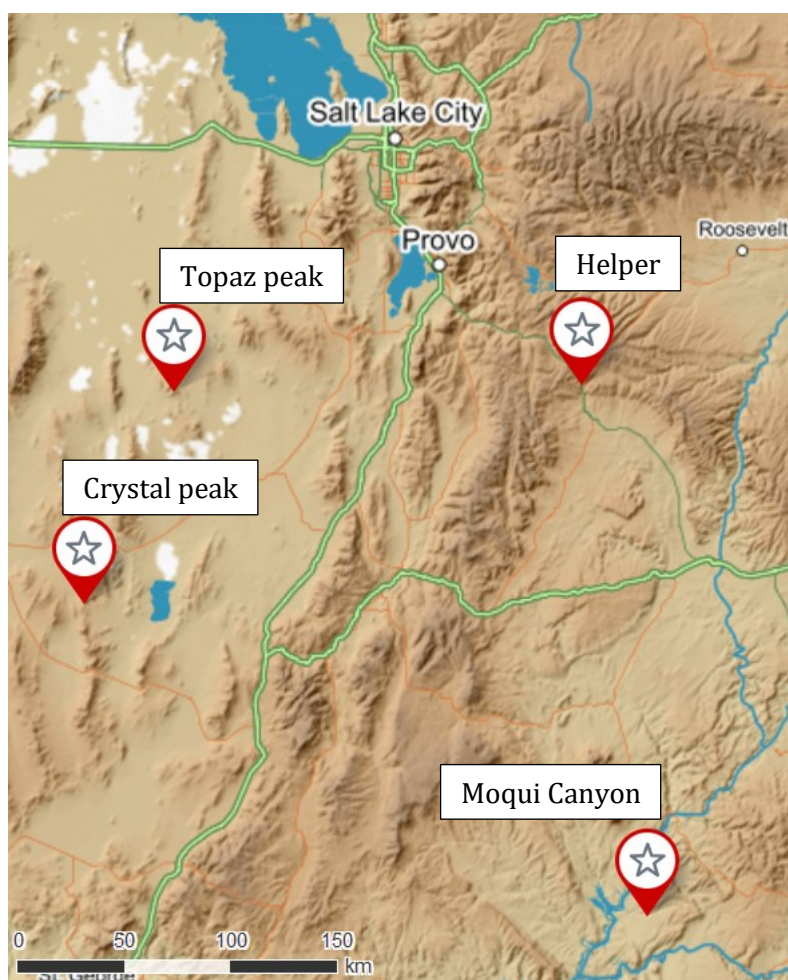
Obr. 4.17: Detail tafone na Crystal peaku

Topaz peak

Erozní zbytek tufů a ryolitových až ryodacitových lávových proudů terciárního stáří tvořících výraznou dominantu. Lokalita je známá mineralogická lokalita s výskytem topasu, hematitu a berylu (Staatz a Griffitts, 1961). Na lokalitě se nachází tafoni i voštiny na jednom místě (obr. 4.18), ve kterých jsem měřil hloubku výparové fronty. Lokalita je nezastíněná a nekrytá před deštěm. Leží v aridním klimatu, průměrné roční srážky jsou 150 mm a průměrné roční teploty 12 °C.



Obr. 4.18: Tafone s voštinami na Topaz peaku



Obr. 4.19: Lokality v Utahu, USA (mapy.cz)

Tabulka 4.2: GPS souřadnice lokalit v Utahu, USA

lokalita	N	E
Helper 1	39,2710	-110,868
Hepler 2	39,7265	-110,869
Helper 3	39,7275	-110,868
Moqui Canyon 1	37,4343	-110,527
Moqui Canyon 2	37,4387	-110,524
Moqui Canyon 3	37,4533	-110,490
Moqui Canyon 4	37,4639	-110,509
Moqui Canyon 5	37,4708	-110,494
Crystal peak	38,7963	-113,595
Topaz peak	39,6919	-113,107

5. Metodika

5.1. Materiály a přístroje

Materiály použité v laboratoři

Jestřebice

Pro tuto práci jsem využil vzorky odebrané z bývalé tzv. Jestřebické jehly na Kokořínsku, což byla skalní věž střednězrného pískovce turonského stáří jizerského souvrství, která se zřítíla v lednu 2014 (Svobodová, 2015).

Ytong

Na prvotní experimenty byl použit pórobeton, prodávající se pod značkou Ytong P2-500.

Nosič barviva

Jako nosič barviva jsem většinou používal nerezové chirurgické jehly, prodávající se pod obchodní značkou STERICAN. V menším množství jsem používal pletací jehlice, závitovou tyč, nerezový drátek na čištění jehel, dřevěnou špejli, závitovou tyč a polyvinylchloridovou (PVC) štětinu z koštěte (tabulka 5.1).

Tabulka 5.1: Typy použitých nosičů barviva

Typ nosiče barviva	Průměr [mm]	Délka [cm]	Materiál
Chirurgická jehla	0,8	12	Nerezová ocel
Pletací jehlice	1,1	15	Ocel
Drátek na čištění jehel	0,2	5	Nerezová ocel
Špejle	3,0	25	dřevo
Štětina z koštěte	0,2	4	PVC
Závitová tyč	1,5	35	Nerezová ocel

Vrtačka a vrtáky

Vrtačku jsem nejčastěji používal akumulátorovou DeWalt s příklepovým vrtáním. Vrtáky jsem používal buď diamantové o průměru 1,5 až 2 mm nebo vidiové o průměru 3–9 mm a délce až 300 mm.

Lepidla

Lepidlo pro připevnění barviva k nosiči jsem používal polyuretanové, prodávající se pod obchodním názvem UHU All Purpose Power. Toto lepidlo se prodává v tubách o objemu 33 ml. Další zkoušená lepidla byla polyvinylacetátový Herkules, vinylový pryskyřičný Superfix, cyanoakrylátový Loctite Super Glue, silylový Liquid Nails, arylátový Loctite Thread, silikonový Porcelain Chip Fix a Gorilla Clean Glue (tabulka 5.2).

Tabulka 5.2: Použitá lepidla lepidel

č.	Typ lepidla	Efektivní látka	Obchodní název	Prodávající (stát)
1	Polyurethanové lepidlo	Polyuretan	UHU All Purpose	Z-Trade (Česko)
2	Polyvinyl acetátové lepidlo	Polyvinyl acetát	Herkules univerzální	Druchema (Česko)
3	Vinyl-pryskyřičné lepidlo	Kopolymer vinylchloridu a vinylacetátu	Superfix	Superfix Production (Česko)
4	Cyanoakrylatové lepidlo	Ethyl cyanoakrylát	Loctite Super Glue	Henkel Corporation (USA)
5	Silylové polymerové lepidlo	Silylový polyether	Liquid Nails	PPG Industries (USA)
6	Akrylové lepidlo	Metakrylát ester	Loctite Thread Red 271	Henkel Corporation (USA)
7	Lepidlo na bázi rozpouštědla	oxid titaničitý a n-Butyl acetát	Porcelain Chip Fix	Pacer Technology (USA)
8	Silikonové lepidlo	Methoxy-siloxany a silikony	Gorilla Clear Glue	The Gorilla Glue Company (USA)

Barviva

V experimentech jsem nejčastěji používal barvivo uranin, což je sodná sůl fluoresceinu s chemickým vzorcem $C_{20}H_{10}Na_2O_5$, CAS: 518-253-0, CI: Acid Yellow 73. Uranin v práškové formě je tmavě červený, ve vodném roztoku při snižování koncentrace mění barvu z červené přes žlutou až na světle zelenou. Uranin je fluorescenční, což znamená, že adsorbuje světlo o určité vlnové délce a emituje světlo o delší vlnové délce. Schopnost fluorescence se ztrácí při vyšších koncentracích (Käss, 1998).

Jako další barvivo jsem používal brilantní modř FCF (CAS: 3844-45-9), což je organická látka, která se používá k barvení potravin, a v pedologii pro vizualizaci infiltračních drah. V pevné fázi jsou to tmavě modré krystalky, které jsou ve vodném roztoku modré, ve více zředěném roztoku světle modré (Käss, 1998). Brilantní modř se sorbuje více než uranin (Weiss et al., 2018a).

Třetí barvivo, které jsem používal, byl sulforhodamin B (CAS: 3520-42-1). Je to fluorescentní organická látka, která se používá v potravinářství, medicíně a krasové hydrogeologii. V pevném skupenství jsou to červenohnědé krystaly, které po rozpuštění zbarví vodu do červena, v řidším roztoku do růžova (Torres et al., 1997).

Poslední mnou používané barvivo byl manganistan draselný, známý pod označením hypermangan. Jedná se o černošedou, krystalickou sůl s chemickým vzorcem KMnO_4 . Vodný roztok má při velkém zředění růžovou barvu, ve větších koncentracích fialovou. Manganistan draselný se používá jako oxidační činidlo a v lékařství (Vohlídal et al, 1999).

5.2. Experimenty

5.2.1. Experimenty za účelem vyvinutí metody lokalizované výparové fronty v úzkém otvoru

Mým cílem bylo vytvořit minimálně destruktivní metodu pro určování hloubky výparové fronty za pomoci detekce vodou rozpustného barviva, které by dokázalo zobrazit výparovou frontu v malém otvoru. Podle zvolené hypotézy jsem zkoušel zjistit vhodné složení, kde by se na jehlu nanese za pomoci vhodného přilepení vodou rozpustné barvivo v prášku. K tomu jsem musel provést sérii experimentů, ze kterých vzniklo výsledné složení jehly.

Výběr nosiče barviva

Tímto experimentem jsem chtěl zjistit, jaké materiály se dají použít pro nosič barviva (jehlu). Celkem jsem zkoušel 6 materiálů: chirurgickou jehlu, pletací jehlici, drátek na čištění jehel, dřevěnou špejli, závitovou tyč, umělohmotnou štětinu z koštěte a závitovou tyč (tabulka 5.1).

Výběr lepidla

Nejdříve jsem potřeboval zjistit, jak budou jednotlivá lepidla reagovat s uraninem. Na různé lepicí pásy (páska Milan, tackle-it, scotch indoor, elektrická páska, transparent tesa 55743) a lepidla (UHU, Herkules) jsem jemně naprášil uranin a zaznamenal změnu barvy, příp. struktury práškového uraninu.

V dalším kroku jsem zkoušel, jaká lepidla se dají použít pro miniaturizaci metody určování hloubky výparové fronty. Sledoval jsem, jestli dané lepidlo na jehle reaguje s uraninem a jestli jde pomocí jehly s tímto lepidlem zobrazit výparová fronta. Pro tento experiment jsem použil lepidla Superfix, Loctite Super Glue, Liquid Nails, Loctite Thread, Porcelain Chip Fix a Gorilla Clean Glue (tabulka 5.2).

Výběr barviva

Předpokladem pro tento experiment byla hypotéza, že lze použít jakékoliv ve vodě rozpustné barvivo, které při rozpouštění mění barvu. Proto jsem si připravil uranin, brilantní modř, sulforhodamin B a manganistan draselný a porovnal jsem výsledky využití těchto barviv při měření zdánlivé hloubky výparové fronty daným barvivem na dvou výchozech na lokalitě Kralupy.

Miniaturizace metody používající práškové barvivo – prvotní experimenty

Miniaturizace metody určování hloubky výparové fronty jsem nejdříve prováděl v laboratorních podmínkách na pórobetonu Ytong a pískovcovém jádru z Jestřebic a později v terénu. Nejdříve jsem v laboratoři vyvrtal z Ytongu a z pískovce 2 jádra o průměru 7 cm a výšce 6 cm. Ty jsem umístil do misky s 1 cm vody, aby nasály vodu. Po 30 minutách, kdy voda vyvzlínala přibližně do poloviny, jsem jádra vyndal a vyvrtal do jejich středu otvor. Do vyvrtaného otvoru jsem vložil jehlu s barvivem tak, aby byla v kontaktu se stěnou otvoru a nechal ji reagovat. Po 10 minutách, během kterých barvivo na jehle reagovalo s vodou v jádře, jsem jehlu z otvoru vytáhl a porovnal délku zbarvené jehly s viditelně mokrou zónou na vnějším plášti jádra. Abych přesněji porovnal výparovou frontu zobrazenou roztokem barviva s údajem z jehly, tak jsem zopakoval předchozí experiment, ale místo vody jsem použil roztok uraninu o koncentraci 1 g/l. Po vytažení jehly jsem jádro rozřízl pilou na beton skrz otvor a porovnal rozdíl v zobrazení výparové fronty roztokem barviva a jehlou.

Prvotní experimenty na přirozených výchozech

První experimenty v terénu probíhaly na lokalitě Mladějov a Malobratřice. Na podlokalitě Mladějov 1 jsem do skalního výchozu vyvrtal pět otvorů a na Mladějově 2 tři otvory, všechny o hloubce 6 cm, a umístil do nich jehly připravené z předchozího dne. Používal jsem tři chirurgické jehly z nerezové oceli a sedm pletacích jehlic z oceli. Na lokalitě Mladějov 1 jsem nechal jehly v otvoru 30 sekund, na lokalitě Mladějově 2 dvě minuty. Na lokalitě Malobratřice jsem vyvrtal dva otvory do hloubky 5 cm a umístil do nich jehly, které jsem tam ponechal 3 minuty.

Dále jsem chtěl zjistit, zda jde detekovat výparovou frontu v prachovcích a vápencích. V prachovci jsem měřil v Radotíně nad urnovým hájem, kde jsem vyvrtal otvor do hloubky 2,6 cm. Ve vápencích jsem měřil v opuštěném lomu v přírodní rezervaci Klapice. Zde jsem v masivních vápencích vyvrtal otvor do hloubky 3 cm a v poloze vápencových břidlic otvor do hloubky 6 cm.

Vzlínání po jehle

Tímto experimentem jsem chtěl zjistit, jak mohou být výsledky ovlivněny vzlínáním vody po jehle s uraninem, neboli o kolik blíže k povrchu dojde k zobrazení výparové fronty na jehle než je skutečnost (v pórovém prostoru). Nejprve jsem upevnil do kovového stojanu připravenou uraninovou jehlu a vložil jsem ji polovinou do nádoby s vodou. Pak jsem měřil vzdálenost zobrazené výparové fronty na jehle od vodní hladiny.

U předchozího experimentu bylo riziko, že voda smyje uranin z jehly. Proto jsem provedl další experiment, který měl lépe simulovat přirozené podmínky. Postupoval jsem stejně jako v předchozím případě, jen jsem místo do vody umístil jehlu do pískovcového jádra, které jsem nechal 30 minut nasáknout ve vodě, obdobně jako při prvotních experimentech.

Abych zjistil, jak je vzlínání po jehle ovlivněno vlhkostí pískovce, rozhodl jsem se uspořádat stejný pokus, kde ale budu znát vlhkost měřeného vzorku. Pro tento experiment jsem použil

pět jader pískovce z Jestřebic, které jsem nejdříve vysušil (24 hodin v peci při 105 °C) a poté zvážil, čímž jsem určil suchou hmotnost (m_d). Abych získal různé vlhkosti, tak jsem vzorky namočil na 60 minut do vody (m_{sat}) a čtyři vrátil zpět do pece. Jeden vzorek jsem opět zvážil (m) bez sušení, abych dostal vlhkost rovnou polní kapacitě vzorku. Ostatní vzorky jsem vyndal z pece po 30, 60, 90 a 120 minutách. Aby se rozložení vlhkosti ve vzorku homogenizovalo, tak jsem vložil každý vzorek mezi dvě plastová víčka, která jsem slepil elektrikařskou páskou, a nechal 24 hodin v klidu. Poté jsem vzorky vyndal, zvážil (m), připevnil ke stěnám jádra pomocí kovového stojanu jehlu a sledoval, o kolik mm vyvzlíná voda po jehle s uraninem v čase.

Ke zjištění míry vztlínání vlhkosti po jehle v porézním prostředí za známého sacího tlaku jsem použil zařízení na měření retenční křivky materiálů (obr. 5.1). V misce je písek přikrytý folií, aby nedocházelo k výparu. Písek je přes keramickou porézní destičku spojený s hadičkou, na které jde odečíst tlaková výška. Zde jsem si přesně mohl nastavit sací tlak měřeného střelečského písku. První experiment jsem prováděl při sacím tlaku 0 cm, druhý při 3,5 cm a třetí při 7 cm. Jehlu jsem položil na vlhký písek a sledoval, jak se mění barva jehly, zejména na hranici nádoby.



Obr. 5.1: Pokusný aparát pro sledování chování jehly při známém sacím tlaku

Měření hloubky výparové fronty v nezpevněném materiálu

Měření hloubky výparové fronty jehlovou metodou probíhalo jak v terénních podmínkách, tak v laboratoři. První experiment proběhl v bývalé pískovně v Novém Dvoře. Nejdříve jsem dutou plastovou trubičkou o průměru 5 mm udělal do eluvia otvor o hloubce 10 cm. Poté jsem trubičku vytáhl a do vzniklého otvoru jsem umístil jehlu.

V laboratorních podmínkách byl experiment proveden v jemnozrnném písku z lomu Střeleč. Nejdříve jsem vyzkoušel stejný postup jako v případě bývalé pískovny. Poté jsem nechal jehlu zaschnout a vsunul ji přímo do písku.

Zjišťování vhodné doby ponechání jehly v otvoru

Tímto experimentem jsem chtěl zjistit, jaká je vhodná doba ponechání jehly v otvoru. Během tohoto experimentu jsem umístil jehlu do vyvrtaného otvoru ve výchozu v Mladějově 1. Dvě minuty jsem nechal jehlu v otvoru, poté jsem ji vytáhnul a vyfotografoval barvivo na jehle a vrátil jehlu zpět do otvoru. Tento postup jsem opakoval 30 minut.

Odstranění prachu z vrtání a jeho vliv na určení hloubky výparové fronty

Při vrtání vzniká prach, který by teoreticky mohl ovlivnit měření hloubky výparové fronty. Proto jsem musel vymyslet způsob, jak prach odstranit. K odstranění prachu jsem použil ruční vzduchovou pumpičku tak, že jsem zasunul jehlu na nafukování balónů do otvoru a prach vyfoukal. V případě hlubších otvorů jsem na tuto jehlu nasadil dutou trubičku o průměru 2 mm a délce 8 cm a postupoval analogicky.

Pro zjištění, jak prach ovlivňuje měření, jsem na lokalitě Mladějov 1 vyvrtal dva otvory 3 cm od sebe, kde jsem předpokládal stejnou hloubku výparové fronty. V jednom jsem prach vyfoukal výše zmíněným postupem, ve druhém jsem prach nechal. Poté jsem umístil jehly do obou otvorů a změřil hloubku výparové fronty a porovnal výsledky.

Vliv vzdušné vlhkosti na vzhled jehly

Abych zjistil, zda může jehla s uraninem reagovat změnou barvy při vyšší vzdušné vlhkosti i bez kontaktu s porézním prostředím, jsem provedl experiment, kdy jsem udržoval jehlu při konstantní vzdušné vlhkosti a sledoval změnu barvy. Proto jsem využil faktu, že nasycený roztok některých solí udržuje v uzavřeném systému konstantní vzdušnou vlhkost a připravil si plastovou nádobu o rozměrech 47×33×18 cm, do které jsem nalil 1,5 l nasyceného roztoku dané soli ve vodě. Abych vytvořil uzavřený systém, tak jsem celou konstrukci s jehlou přikryl obráceným akváriem o rozměrech 42×16×21 cm, ve kterém byl větrák, který zajišťoval homogenizaci vlhkosti a na kovové konstrukci položené na dně nádoby bylo připevněné čidlo Greisinger electronic GMH 3350 na měření vlhkosti a teploty a jehla s barvivem (obr. 5.2). První sůl jsem použil chlorid sodný (NaCl) s rovnovážnou vlhkostí 75,0 % a druhou chlorid draselný (KCl) s rovnovážnou vlhkostí 88,0 % (O'Brien, 1948).



Obr. 5.2: Měření vlivu vzdušné vlhkosti na jehlu s barvivem

Porovnání nové metody s metodou vizualizací barvivem v prášku

Porovnání nové metody s publikovanou metodou využívající velké otvory (Weiss et al., 2018a) jsem provedl v lomu Střeleč. Tam jsem odvrtal jádro o průměru 7 cm a hloubce 5 cm a štětečkem nanasl práškový uranin na stěnu vyvrtaného otvoru a nechal barvivo rozpustit. O pět centimetrů vedle jsem vyvrtal otvor pro jehlu a změřil hloubku výparové fronty pomocí jehly s uraninem (obr. 5.3).



Obr. 5.3: Porovnání hloubky výparové fronty novou metodou a starší metodou ve velkém otvoru

5.2.2. Experimenty týkající se využití nové metody pro určení výparové fronty

V následujících experimentech jsem využil novou metodu pro určování hloubky výparové fronty při studiu chování vlhkosti v porézních materiálech. Detailní popis metody je v kap. 6.1.

Měření v profilech (skály, stavby)

Cílem souboru experimentů bylo najít hloubku výparové fronty podél vertikálních profilů pro zjištění zda vlhkost vzlíná z půdy či vodní hladiny nebo zda přitéká z masivu. Na bázi vertikálního profilu byla obvykle půda, nebo hladina jezera či toku. Svrchní část profilu byla typicky ukončena v skalní stěně a byla limitována dosahem žebříku. Experimenty jsem prováděl jak na přírodních výchozech, tak i na umělých stavbách. Na přirozených výchozech jsem měřil na lokalitách Mladějov 1, Mladějov 2, Střeleč, Helper 3 a Moqui Canyon 1 a 2 a v umělých stavbách v Novém Hobzí, Brandově, Hřebečnickách, na mostě v Prokopském údolí, na Pražském hradě a stěně u Pekařovy brány

Tafoni a voštiny

Tafoni a voštiny jsou nejběžnější projevy kavernózního zvětrávání. Voštiny a tafoni mají prohlubně, které déle nazývám kaverny. Voštiny mají kaverny v řádu jednotek centimetrů, zato tafoni mohou tvořit kaverny několik metrů velké (Bruthans et al., 2018). Tento

experiment měl určit pozici výparové fronty a ověřit zda je uvnitř kaveren blíže k povrchu než mimo ně (Schnepfleitner et al., 2015). Prováděn byl na tafoni na lokalitách Helper a Crystal peak, na voštinách v Moqui canyonu 5 a jak na voštinách, tak na tafoni na Topaz peaku. V Helperu 1 jsem nestihl provést všechna měření v jeden den. První den jsem v tafone měřil na čtyřech místech, druhý den jsem zopakoval měření na všech otvorech a k tomu vyvrtal čtyři nové otvory. Aby nedošlo přes noc k vyschnutí otvorů, tak jsem je utěsnil igelitovou folií.

Převisy

Tímto experimentem jsem chtěl zjistit, zda je rozdíl v hloubce výparové fronty v převisu a ve stěně vedle něj. Měření probíhalo na lokalitách Moqui Canyon 3 a 4. V prvním převisu (Moqui Canyon 3) jsem vyvrtal čtyři otvory a jeden otvor ve stěně mimo. V druhém převisu (Moqui Canyon 4) jsem z důvodu deště nemohl vyvrtat otvory ve stěně mimo převis, tak jsem měřil pouze ve dvou otvorech v převisu.

Opakované sledování hloubky výparové fronty

Cílem těchto experimentů bylo zjistit, jak se mění hloubka výparové fronty v čase. Monitoring hloubky výparové fronty probíhal od září 2018 v nepravidelných intervalech na třech profilech na lokalitě Prosek do dubna 2019. Aby nedošlo k vysychání otvoru, tak jsem po ukončení měření ucpal otvory igelitovou folií. Během experimentu jsem měl k dispozici srážkové údaje z letiště Ruzyně.

Porovnání metody měření hloubky výparové fronty s měřením vlhkosti protimetrem

Těmito experimenty jsem chtěl zjistit, jestli naměřené hodnoty běžně používaných metod pro určení vlhkosti závisí na hloubce výparové fronty či nikoli. Porovnával jsem jehlovou metodu s měřením elektrické vodivosti prováděl protimetrem Greisinger electronic GMR 110 nastaveným na referenční hodnotu měření (dále tuto veličinu nazývám „ukazatel vlhkosti“). Porovnání metod probíhalo na lokalitě Moqui canyon, Crystal peak a Topaz mountain ze všech naměřených hodnot.

6. Výsledky a diskuse

6.1. Výsledky experimentů, týkající se vývoje nové metody

Výběr nosiče barviva

Materiál nosiče barviva (dále jehly) není zásadní pro provádění experimentu, ale jako nejvýhodnější se jeví zdravotnická jehla z nerezové oceli, protože nereaguje s lepidlem a snadno se po skončení experimentu očišťuje od lepidla. Naopak jako nepoužitelné se jeví dřevo, které reaguje s lepidlem a znemožňuje interpretaci. Důležitější než materiál jsou

rozměry. Jehla by měla být co neušší, aby nebylo třeba vrtat příliš velký otvor, ale zároveň co nejdelší, protože v některých případech je třeba nalézt výparovou frontu v hloubkách > 10 cm.

Výběr lepidla

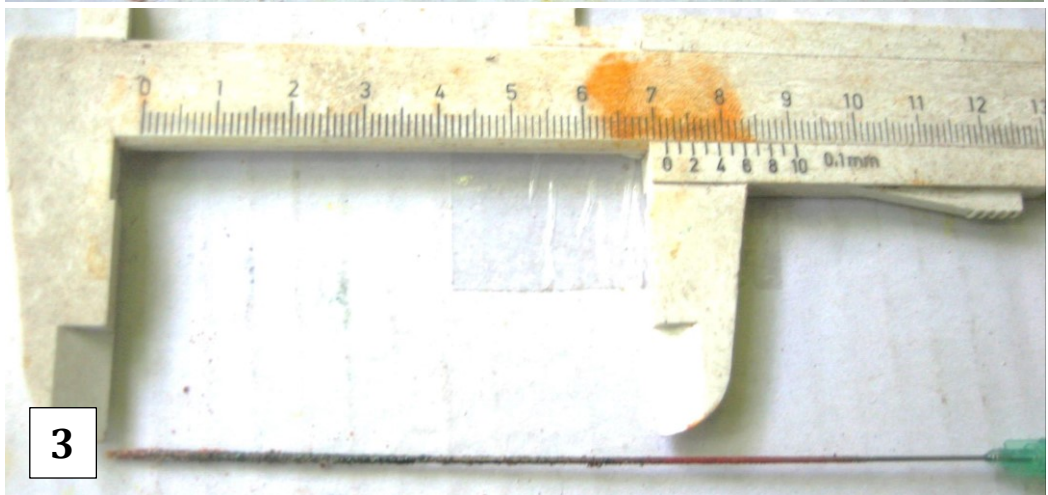
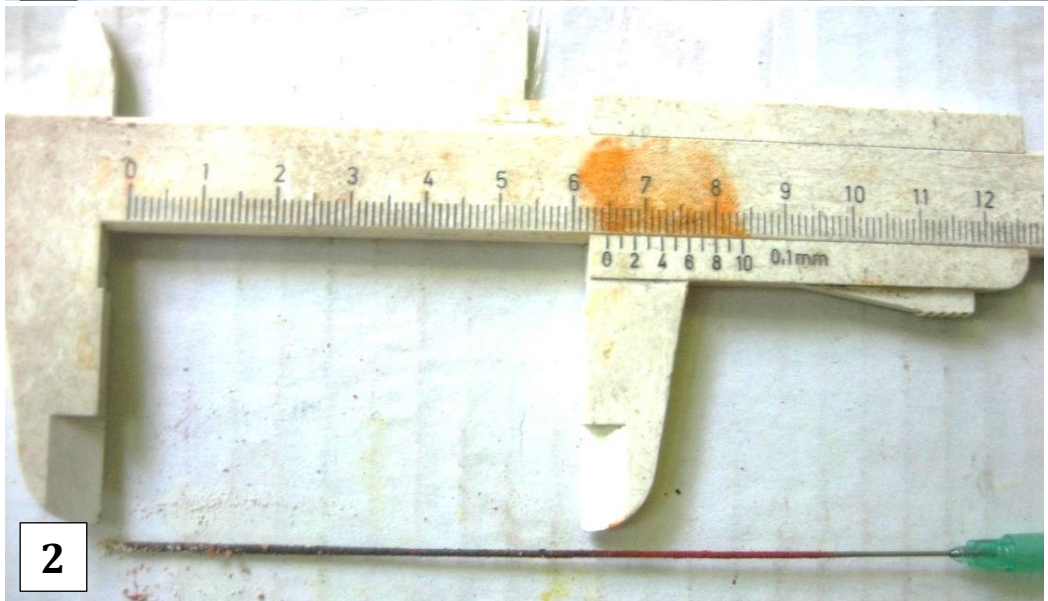
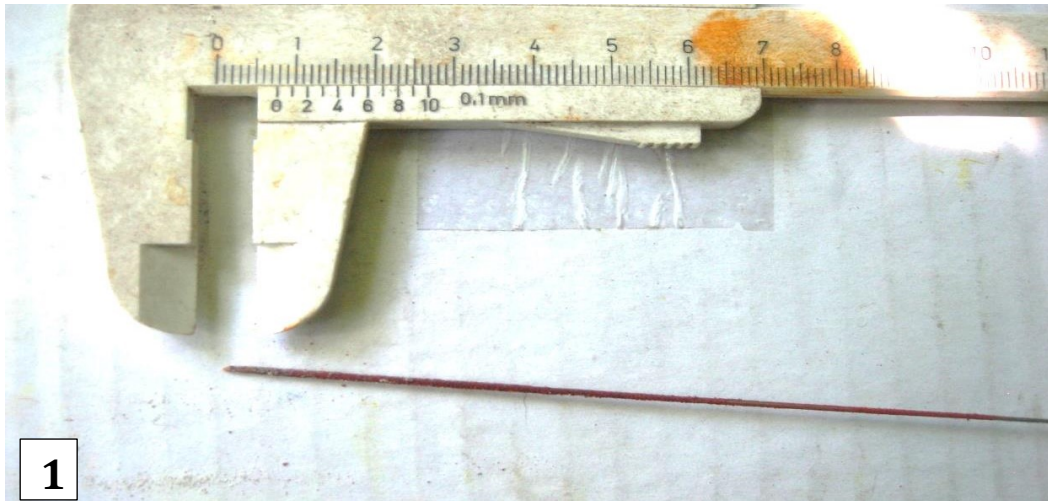
Celkem jsem vyzkoušel 8 lepidel, 4 lepicí pásky a 1 lepicí gumu (tabulka X), Lepidlo je možné použít jakékoliv, které nereaguje s uraninem a zároveň umožňuje, aby mohl uranin reagovat s vlhkostí v otvoru. Výhodou je takové lepidlo, které jde snadno odstranit z jehly po skončení experimentu, což umožňuje opakované použití jehly. Pro detekci výparové fronty pomocí jehlové metody se 5 lepidel nedá použít vůbec, 2 lepidla se dají podmíněně použít a 1 se dá použít. Lepidla, která se nedají použít, jsou Herkules, Superfix, Loctite Super Glue, Loctite Thread a Gorilla Clean Glue, protože buď reagují s uraninem – uranin mění barvu, a tak znemožňuje pozorovat změnu barvy uraninu ve vlhkém prostředí, nebo nedovolí uraninu reagovat s kapilární vodou – uranin se na vrstvě lepidla stane hydrofobní. Částečně pozitivní jsou lepidla Liquid nails a Porcelain Chip Fix. Tato lepidla zobrazí výparovou frontu, ale lepidlo Liquid Nails částečně reagovalo s uraninem, což zhoršovalo interpretaci měření. V případě lepidla Porcelain Chip Fix musela být výparová fronta měřena dříve, než došlo k zaschnutí lepidla na jehle. Po zaschnutí již uranin nereaguje na vlhkost a navíc nejde po ukončení experimentu lepidlo odstranit. Jako zdaleka nejlépe použitelné vyšlo lepidlo UHU All Purpose Power.

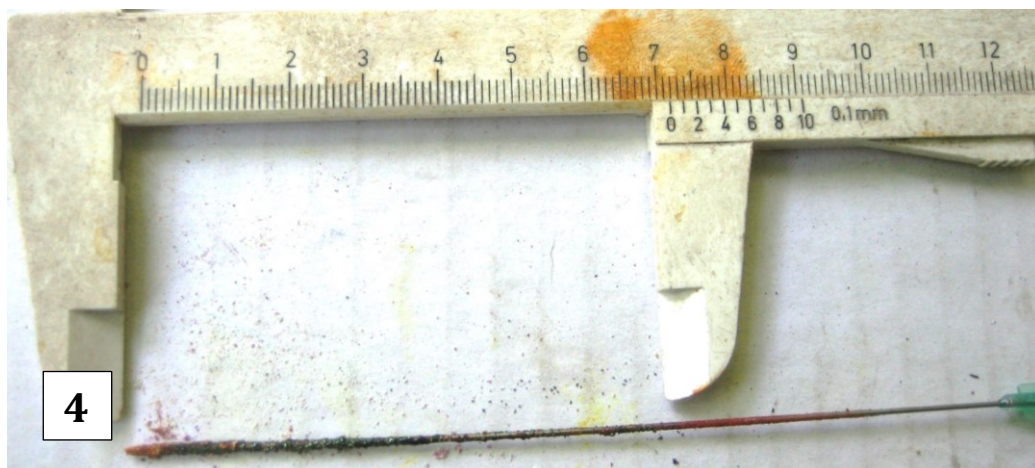
Výběr barviva

Ze zkoušených barviv se v kapilární zóně prokazatelně rozpustí uranin a brilantní modř. Sulforhodamin B na první lokalitě zobrazil přibližně správnou hodnotu, ale k tomu nedošlo vlivem rozpuštění barviva, ale vlivem nalepení vlhkého prachu na jehlu. Manganistan draselný nezobrazil ani v jednom otvoru žádnou hodnotu.

Tabulka 6.1: Kralupy – Dvořákova stezka 1

Lokalita 1						
barvivo	Čas v otvoru [min]	foto 1	foto 2	foto 3	foto 4	Zdánlivá hloubka VF [cm]
Uranin	30	2:00 - 3:00	6:30 - 7:00	13:00- 13:30	22:00- 22:30	0,9
Brilantní modř	32	3:00- 4:00	7:30- 8:00	13:30- 14:00	34:00- 34:30	1
Sulforhodamin B	44	2:00- 2:20	6:30- 7:00	16:30- 17:00	34:30- 35:00	cca 1?
KMnO ₄	45	2:30- 2:45	7:00- 7:30	17:30- 18:00		x

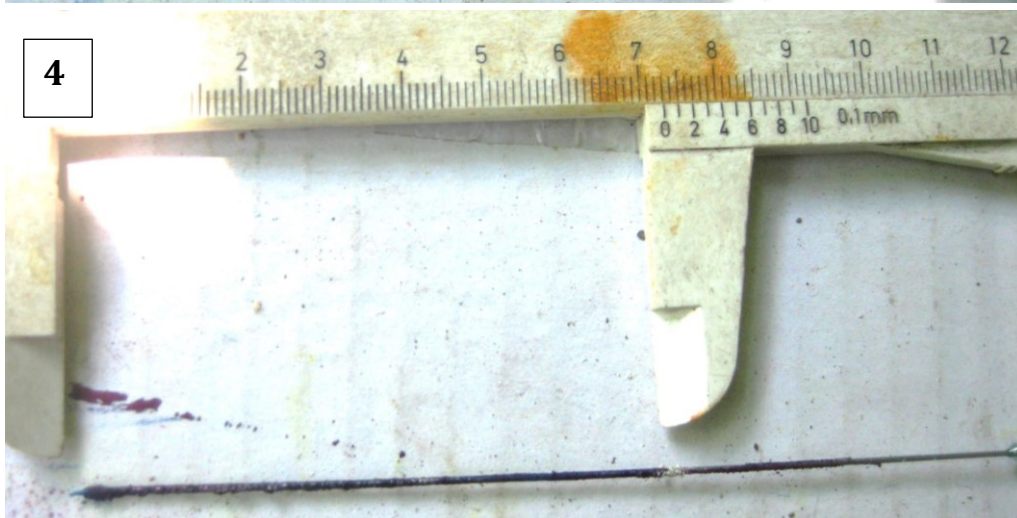




Obr. 6.1: Fotky uraninové jehly v časech 2, 6,5, 13 a 22 minut

Z obr. 6.1 je patrné, že mezi 7 a 13 minutou došlo k rozpuštění veškerého barviva a zobrazení zdánlivé výparové fronty v hloubce 0,9 cm, která se do konce měření nezměnila.





Obr. 6.2: Fotky jehly s brilantní modří v časech 3, 7,5, 13,5 a 34 minut

Z naměřených dat pro Brilantní modř (obr. 6.2) je patrné, že došlo k rozpuštění barviva v kapilární zóně v čase mezi 8:00 a 13:30 minutami, ale do tohoto času se nerozpustilo téměř žádné barvivo. Zobrazená zdánlivá hloubka výparové fronty brilantní modří po ustálení je 1 cm.

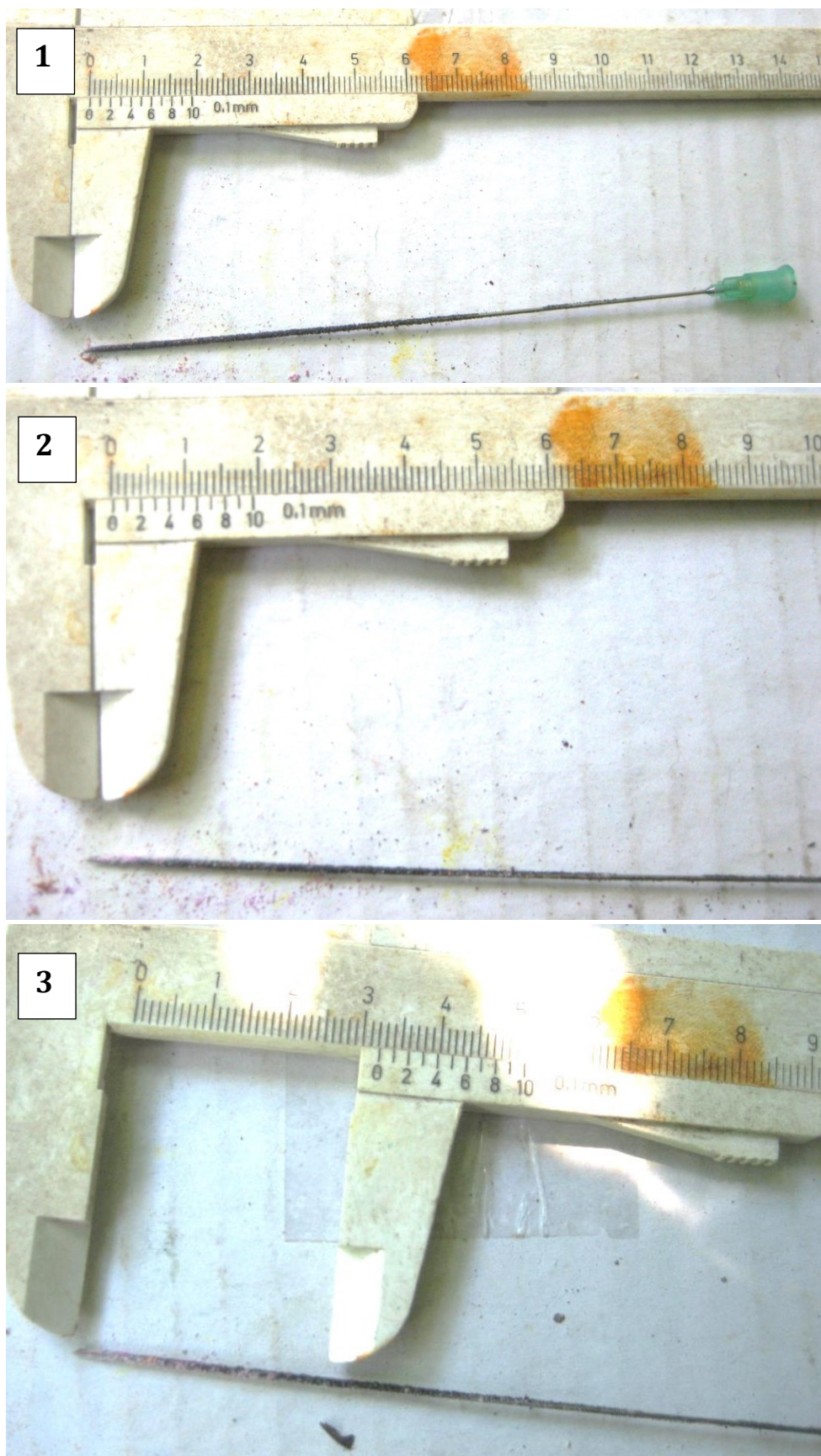




Obr. 6.3: Foto jehly se sulforhodaminem B v časech 2, 6,5, 13,5 a 34,5 minut

U sulforhodaminu B nedošlo ani po 35 minutách k rozpuštění barviva na jehle. Ke změně barvy a možné interpretaci hloubky výparové fronty došlo kvůli tomu, že z jehly v otvoru odpadla zrna barviva, která se v kapilární zóně rozpustila a nalepila na vlhký prach. Po

vytažení byla jehla v kapilární zóně částečně obalená vlhkým prachem, který vyznačoval hloubku výparové fronty (obr. 6.3).



Obr. 6.4: Foto jehly s manganistanem draselným v časech 2,5, 7 a 17,5 minut

Zkoušený manganistan draselný nezobrazil výparovou frontu za celou dobu konání experimentu. Interpretovaná hloubka (obr. 6.4) byla odvozena z nalepeného prachu na jehle.

Tabulka 6.2: Kralupy – Dvořákova stezka 2

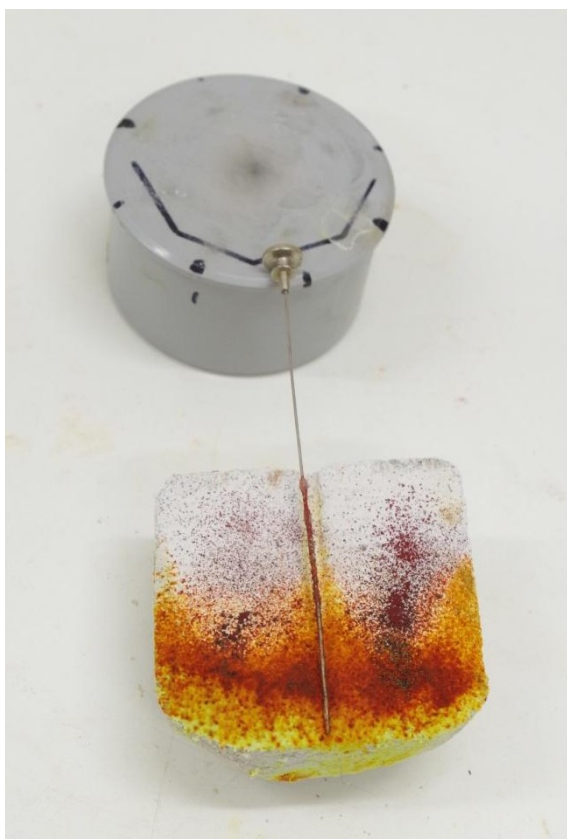
Lokalita 2		
barvivo	Čas v otvoru [min]	hloubka VF [cm]
Uranin	20:30	0,5
Brilantní modř	21	1,0
Sulforhodamin B	21:30	x
KMnO ₄	22	x

Na lokalitě 2 došlo k zobrazení výparové fronty pouze uraninem a brilantní modří. V případě uraninu v hloubce 0,5 cm a brilantní modří 1 cm pod povrchem. Rozdíl těchto hodnot je způsoben špatnou interpretací u brilantní modře, kde nebylo jasné, kde přesně je hranice mezi rozpuštěným a nerozpuštěným barvivem.

Obě měření na lokalitě Kralupy (tabulky 6.1 a 6.2) potvrzují, že Sulforhodamin B ani manganistan draselný se nedají pro detekci výparové fronty jehlovou metodou použít přinejmenším v testovaném čase. Brilantní modř i uranin se jeví jako použitelná barviva, která jsou schopna detekovat výparovou frontu. Brilantní modř má ale jednu zásadní nevýhodu při interpretaci. Vzhledem k tomu, že při rozpouštění nemění barvu, tak se špatně odlišuje vlhká část od suché a může dojít k chybné interpretaci.

Miniaturizace metody používající práškové barvivo – prvotní experimenty

Z první části experimentu vyšlo, že uranin na jehle změnil barvu v stejné hloubkové úrovni, jako byla vizuálně vidět mokrá část jádra. V druhém experimentu po rozříznutí jádra byla výparová fronta zobrazená jehlou ve stejné výšce jako výparová fronta zobrazená roztokem uraninu (obr. 6.5). Z výše uvedeného vyplývá, že jehlová metoda korektně ukazuje hloubku výparové fronty v porézním prostředí.



Obr 6.5: Miniaturizace metody určování hloubky výparové fronty v jádře odvrtném z Ytongu

Při prvotních experimentech s porovnáním jehlové metody a vizualizace výparové fronty roztokem uraninu jsem zjistil, že v jádru z Ytongu byla roztokem uraninu zobrazená výparová fronta rovnoběžná s hladinou, ale v pískovcovém jádře byla vlivem drobných nehomogenit nerovná. Proto se dá předpokládat, že se v přírodním prostředí nebude vždy vyskytovat hladká výparová fronta, ale může docházet vlivem nehomogenit k drobnému rozdílu hloubky u dvou sousedních bodů, které jsou od sebe vzdáleny jen pár milimetrů.

Prvotní pokusy na přirozených výchozech

Na žádné z lokalit v Mladějově nedošlo ke zřetelnému zobrazení výparové fronty novou metodou. První problém nastal již na počátku měření a vytažení připravených jehlic. Připravené jehly začaly při vystavení vzduchu reagovat s vzdušnou vlhkostí. Nezřetelná výparová fronta byla dána krátkou dobou v ponechání jehly v otvoru, kdy nedošlo k dostatečnému rozpuštění barviva k zobrazení výparové fronty.

Na lokalitě Malobratřice došlo k zobrazení výparové fronty v hloubce 3 mm, ale všechen uranin, který odpadl z jehly na stěnu otvoru, se rozpustil, a to až k povrchu. Na základě metody vizualizace vodou rozpustným barvivem se tedy výparová fronta nacházela až na povrchu. Rozdíl v měření je dán tím, že při vrtání otvoru došlo k postupnému obrušování kraje a rozšiřování otvoru u povrchu. Vlivem toho jehla v blízkosti povrchu nebyla v dostatečném kontaktu s horninou a nedošlo u ní v těchto místech k rozpuštění uraninu. V místech kontaktu s horninou byla jehla vlhká po celé délce. Z tohoto důvodu se zdála výparová fronta měřená novou metodou hlouběji než ve skutečnosti.

V prachovci a v masivním vápenci jsem výparovou frontu do hloubky 2,6 cm, respektive 3 centimetrů nezastihl, v polohách vápencových břidlic byla výparová fronta v hloubce 3 cm. V prachovci a masivním vápenci jsem vyvrtal otvor pouze do hloubky 2,6 respektive 3 cm, protože vrtání bylo obtížné a trvalo velmi dlouho. Docházelo při tom k zahřívání vrtáku, což mohlo vysušit okolní prostředí a zkreslit tak hloubku výparové fronty oproti přirozenému stavu. Pokusy v jiných horninách než pískovci je tak třeba v budoucnu opakovat.

Vzlínání po jehle

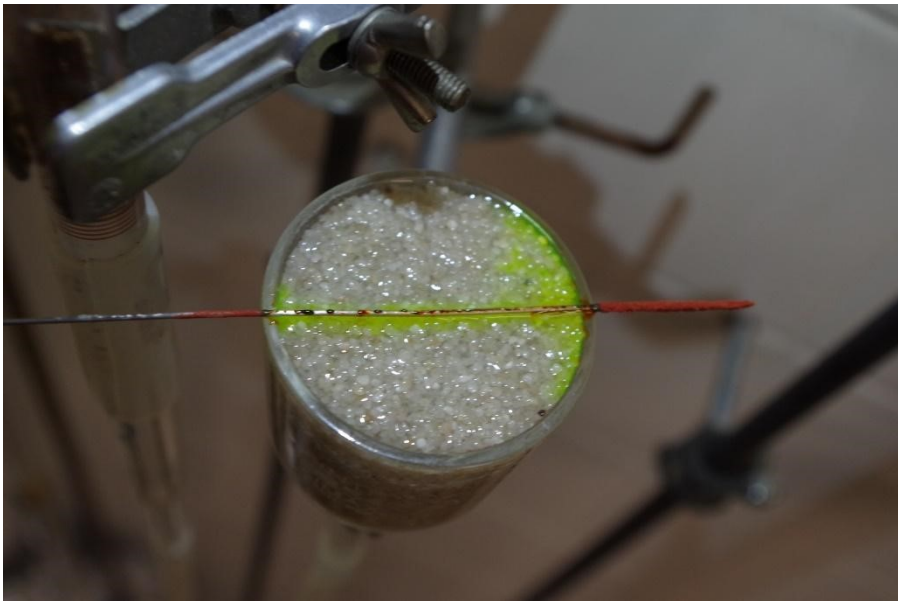
Experiment s ponořením jehly do vody ukázal, že vzlínání po povrchu jehly s lepidlem a uraninem má vliv na detekovanou hloubku výparové fronty. Ihned po vsunutí do vody došlo k vyvzlínání do výšky 3 mm. Poté vzlínání ustalo, protože došlo k smytí uraninu pod vodní hladinou.

Tabulka 6.3: Hmotnostní vlhkosti a výšky vzlínání v $t=10$ min

č.	t v peci [min]	hmotnostní vlhkost	vzlínání [mm]
1	0	0,137	3-4
2	30	0,097	1
3	60	0,074	0
4	90	0,044	0
5	120	0,017	0

Během experimentu s jádry o různých vlhkostech již nedošlo ke smytí uraninu z jehly v mokřím jádru, ale došlo kvůli vzlínání o posun výparové fronty o 3–4 mm nad úroveň jádra, a to pouze u nejvlhčího jádra (tabulka 6.3). U druhého došlo k sotva znatelnému posunu výparové fronty o jeden milimetr a u ostatních jader vzlínání vlhkosti po jehle nebylo pozorováno vůbec. Z toho vyplývá, že vzlínání má vliv pouze při vysokých vlhkostech materiálu (v případě pískovce >10 %) a při nižších ho můžeme zanedbat.

Při sacím tlaku 0 cm došlo ihned po přiložení jehly ke smytí veškerého uraninu a vyvzlínání vody po jehle do výšky 3 mm od hranice materiálu (obr. 6.6).



Obr. 6.6: Vztlínání při sacím tlaku 0 cm v čase 1 min

Při sacím tlaku 3,5 cm během 15 minut nedošlo k viditelnému vztlínání (obr. 6.7).



Obr. 6.7: Vztlínání při sacím tlaku 3,5 cm v čase 15 min

Při sacím tlaku 8 cm trvalo 1,5 h než jehla zřetelně zareagovala na vlhký materiál a došlo k rozpuštění uraninu. K žádnému pozorovatelnému vztlínání nedošlo (obr. 6.8).



Obr. 6.8: Vzlínání při sacím talku 8 cm v čase 90 min

Měření hloubky výparové fronty v nezpevněném materiálu

Při měření v pískovně v Novém Dvoře došlo k jasnému zobrazení výparové fronty stejným způsobem jako ve zpevněných materiálech. V laboratoři ve střelečském písku nejde použít způsob jako ve zmíněném lomu na Šumavě, protože vzniklý otvor se bez podpěry zasype. Při zasunutí jehly do písku v případě čerstvě připravené jehly (bez zaschnutí lepidla) dojde k setření lepidla. Proto je tedy potřeba nejprve nechat lepidlo na jehle zaschnout a až poté měřit.

Zjišťování vhodné doby jehly v otvoru

Doba, po kterou je nutné ponechat jehlu v otvoru, nejde obecně určit. Závisí vždy na typu a vlhkosti daného materiálu. Důležité je, aby došlo k rozpuštění veškerého uraninu v kapilární zóně. Většinou je postačující doba 10 minut (obr. 6.9), ale při měření ve velmi vlhkých materiálech dochází k rychlejšímu rozpuštění barviva a je možné dobu měření zkrátit až na dvě minuty. Naopak v suchých a jemnozrnných materiálech může jedno měření trvat i půl hodiny.



Obr. 6.9: Jehla v časech 4, 6, 8, 10 a 12 minut během zjišťování vhodné doby jehly v otvoru

Odstranění prachu z vrtání a jeho vliv na určení hloubky výparové fronty

V otvoru, kde byl prach odstraněn vyfukováním, se po 10 minutách výparová fronta nacházela 5,3 cm pod povrchem. V otvoru, kde prach odstraněn nebyl, po stejné době nebyla žádná výparová fronta vidět. Až po dalších 7 minutách bylo možno výparovou frontu odhadnout přibližně v 5 cm. Z toho plyne, že prach neovlivní stanovení hloubky výparové fronty, ale zkomplikuje určení reakce s vodou a prodlouží tím délku reakce, a zároveň se nalepí na jehlu, čímž zkomplikuje vizuální interpretaci. Prach je tedy vhodné z návrtů odstraňovat (obr. 6.10).

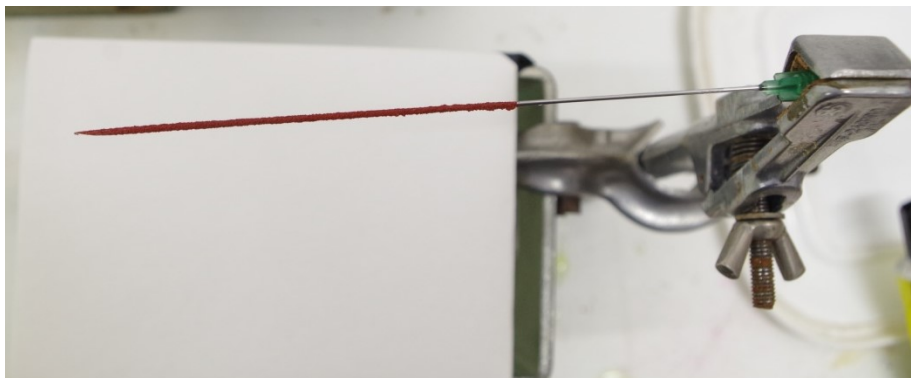


Obr. 6.10: Vyfukování prachu z otvoru

Vliv vzdušné vlhkosti na vzhled jehly

Z tohoto experimentu vyplývá, že při teplotě 20 °C a vlhkosti 75,0 % jehla s vzdušnou vlhkostí nereaguje (obr. 6.11). Při vlhkosti 88,0 % již dochází k zezelenání jehly vlivem

vzdušné vlhkosti (obr. 6.12). Z toho vyplývá, že k reakci s vzdušnou vlhkostí dochází při vlhkostech mezi 75 a 88 %, což umožňuje použití metody při běžných podmínkách jak v aridním, tak v humidním klimatu.



Obr. 6.11: Jehla při vzdušné vlhkosti 75,0 % po 30 minutách



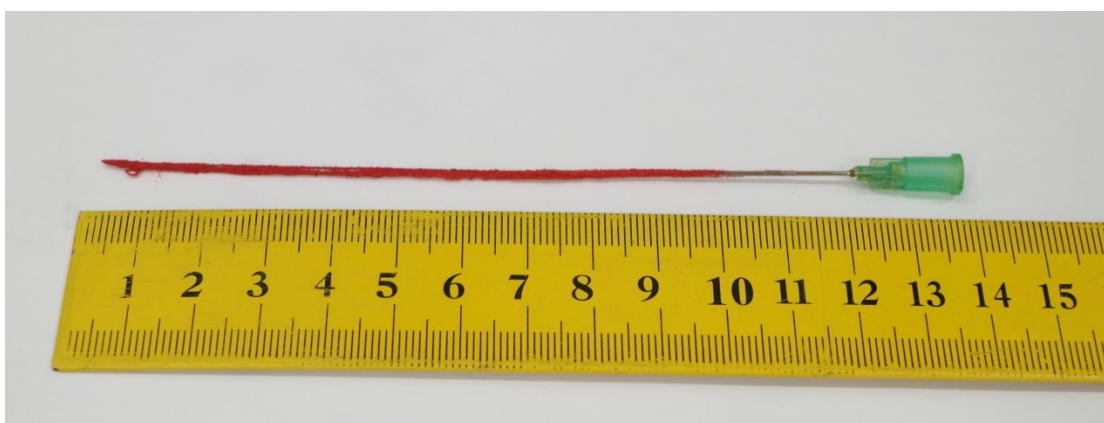
Obr. 6.12: Jehla při vzdušné vlhkosti 88,0 % po 30 minutách

Jehla – ideální postup

Na základě výše popsaných výsledků experimentů jsem sestavil výsledné složení jehly pro detekci výparové fronty v úzkém otvoru a ideální postup pro měření výparové fronty. Potřebné nástroje a materiály jsou chirurgická jehla STERICAN, lepidlo UHU All Purpose Power a práškový uranin. Nástroj k měření hloubky výparové fronty se sestaví následovně: jehla se nejdříve zasune do lepidla a opatrně vytáhne, aby lepidlo rovnoměrně pokrývalo jehlu a nedošlo k jeho setření. Poté se jehla postupně ze všech stran obalí v uraninu, který se na ni nalepí (obr. 6.13). Následně se jehla (obr. 6.14) umístí do předvrtaného otvoru tak, aby se přitiskla ke stranám a umožnila pórové vodě rozpustit uranin.



Obr. 6.13: Kroky přípravy jehly na měření



Obr. 6.14: Připravená jehla

Po 10 minutách se jehla vytáhne z otvoru a interpretuje se barva uraninu. V kapilární zóně dojde k rozpuštění uraninu, při kterém dojde ke změně barvy z červené na zelenou (obr. 6.15). Místo, kde dochází k změně barvy je výparová fronta (obr. 6.16). V případě, že nejde jasně odlišit zóna rozpuštěného uraninu od nerozpuštěného, tak jsem za kapilární zónu považoval místo, kde je více jak 50 % uraninu rozpuštěno.



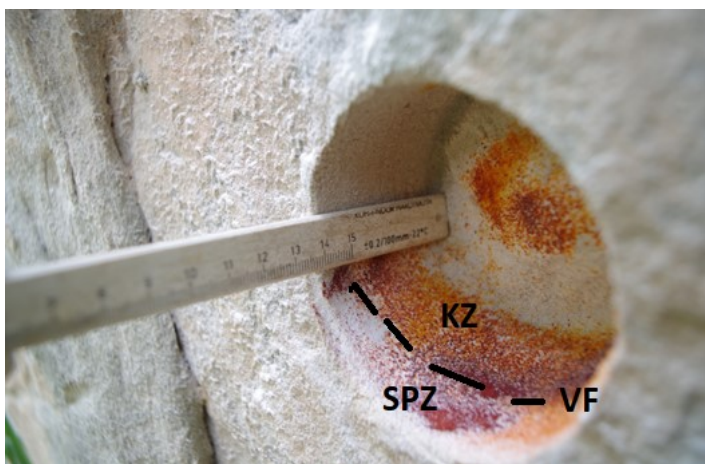
Obr. 6.15: Jehla po vytažení z otvoru



Obr. 6.16: Detail výparové fronty na jehle

Porovnání nové metody s metodou vizualizace barvivem v prášku ve velkém otvoru

Jak z nové metody, tak metodou vizualizace barvivem v prášku ve velkém otvoru byla výparová fronta lokalizována 1,5 cm pod povrchem. Porovnání obou metod ukázalo, že nová metoda určuje výparovou frontu ve stejné hloubce jako metoda používající práškové barvivo v podstatně širším návrtu (6.17).



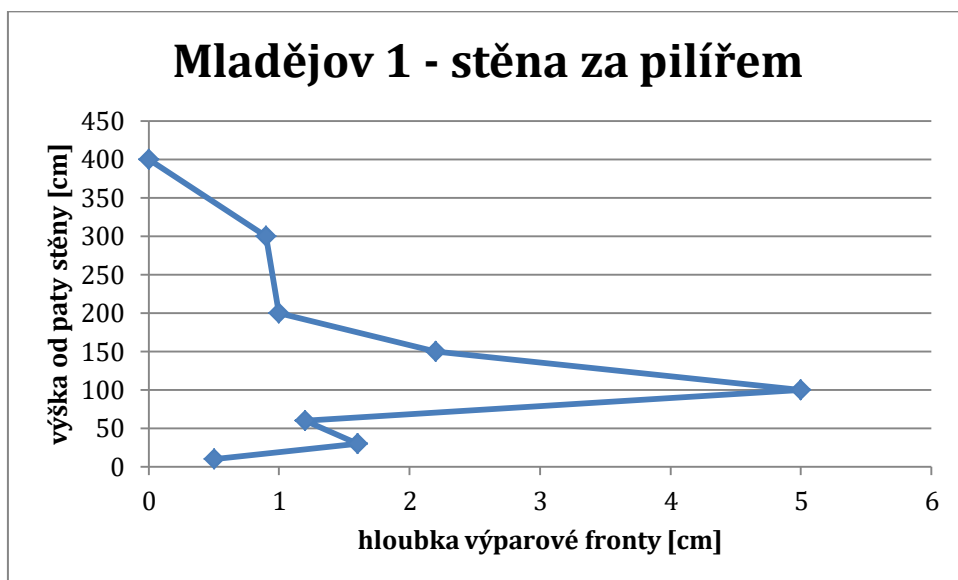
Obr. 6.17: Verifikace nové metody za pomoci vizualizace barviva v prášku

6.2. Výsledky experimentů, týkající se použití

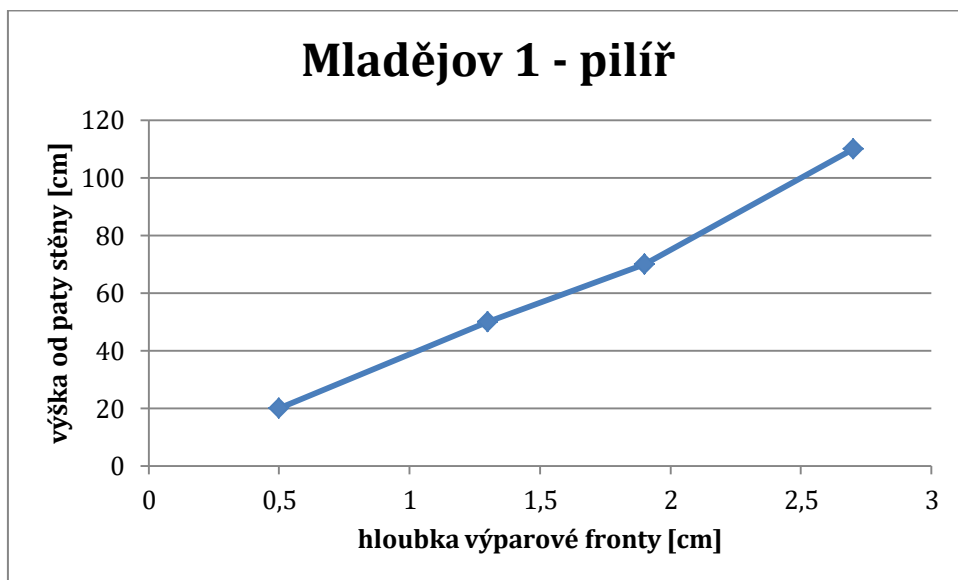
Měření v profilech

Měření na prvním profilu v Mladějově 1 (obr. 6.18), v Mladějově 2 (obr. 6.20) a ve Střelči (obr. 6.21) neukázalo, že by výparová fronta s výškou v profilu ustupovala do větší hloubky v celém profilu. Z naměřených dat je zřejmé, že se vlhkost s výjimkou těsné blízkosti hladiny jezírka v lomu Střeleč nešíří zespoda ale z pískovcového masivu. Zdrojem vlhkosti tedy, alespoň ve vyšších partiích, není půda pod pískovcovým výchozem ale voda obsažená v pískovcovém masivu. V lomu Střeleč byl profil vedený přímo z jezírka na dně lomu. Ve stěně nad jezírkem se efekt vodní hladiny projevil jednoznačně do výšky 70 cm nad hladinu dosahem výparové fronta až k povrchu. Výše výparová fronta zaklesávala, což stále může být efekt jezírka, ale nad úrovní 150 cm nad hladinou jezírka již převládl vliv masivu (pokles výparové fronty do hloubky se stoupající výškou nad hladinou jezírka se vytratil). Gravitační voda se v hrubozrnném pískovci projevuje tedy do výšky 70–150 cm. Kapilární traseň v pískovcích dosahuje do výšky 20 – 25 cm, takže zde dochází ke kombinovanému vlivu gravitační vody a vody z masivu. Vliv na hloubku výparové fronty má heterogenita materiálu, kde je okem vidět změna zrnitosti ve vrstvách s výškou. Dále svůj vliv může hrát reliéf skalní stěny, protože některé části jsou více vystaveny slunečnímu svitu a některé dešti, což ovlivňuje infiltraci i evaporaci.

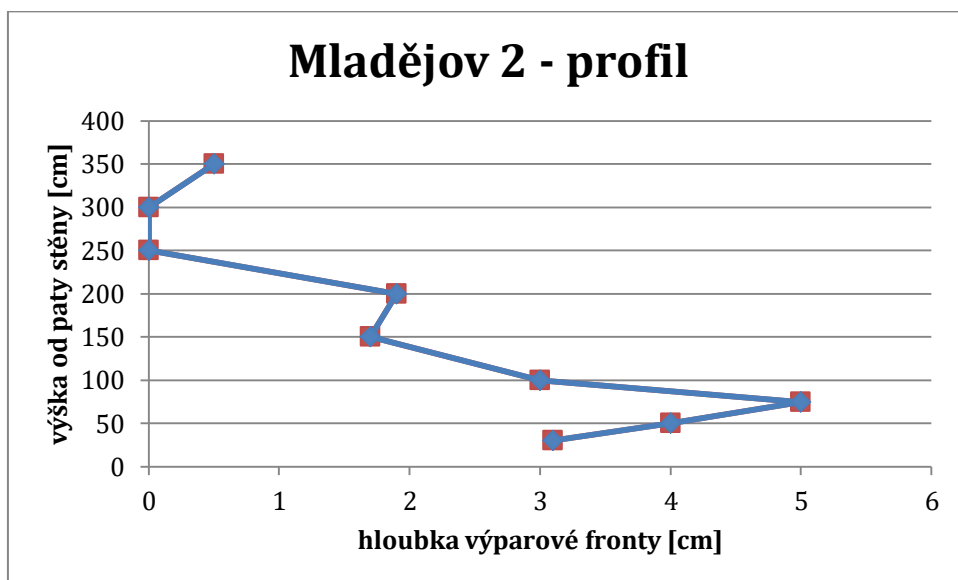
V profilu na pilíři v Mladějově 1 (obr. 6.19) došlo s výškou k zaklesávání výparové fronty. To si vysvětlují omezeným hydraulickým kontaktem s okolním masivem, kdy nedochází k dostatečné dotaci vodou a převažuje tak zdroj vlhkosti z půdy. Pro potvrzení této hypotézy by chtělo změřit více profilů na pilíři a do větší výšky, protože i u ostatních profilů je vidět do výšky 100–150 cm zaklesávání fronty, které pak skončí.



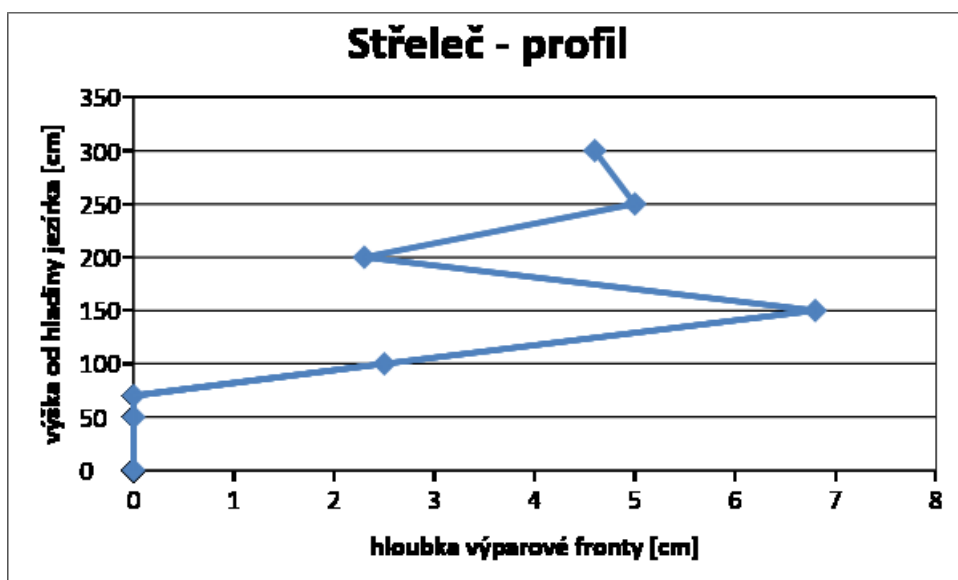
Obr. 6.18: Profil hloubky výparové fronty pod povrchem ve vertikálním profilu v Mladějově 1 profilu 1



Obr. 6.19: Profil hloubky výparové fronty pod povrchem ve vertikálním profilu v Mladějově 1 v profilu 2



Obr. 6.20: Graf hloubky výparové fronty pod povrchem ve vertikálním profilu na lokalitě Mladějov 2



Obr. 6.21: Profil hloubky výparové fronty pod povrchem ve vertikálním profilu v lomu Střeleč

Helper 3

Z následujících dat (tabulka 6.4) je patrné, že není znatelný rozdíl v hloubce výparové fronty mezi polohou se solemi a bez solí. Může to být dáno tím, že měření komplikovalo husté sněžení, které zhoršovalo interpretaci výsledků nebo že vysrážené sole nemají vliv na hloubku výparové fronty v takové blízkosti povrchu. Podle měření vodivosti protimetrem ale ukazují polohy se solemi vyšší vodivost (ukazatel vlhkosti). To je dáno tím, že vrstvy s vysráženými solemi mají vyšší vodivost než vrstvy bez solí a tudíž podle měření vlhkosti protimetrem dochází k chybnému zobrazení větší vlhkosti.

Tabulka 6.4: Helper 3

místo	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	poznámky
Si1	0,4	19	poloha solí
Si2	0,4	22	poloha solí
Si3	0,6	16	poloha suchá
Si4	0,5	13	poloha suchá

Moqui Canyon 1

Na lokalitě Moqui Canyon 1 (tabulka 6.5) je vidět, že v blízkosti jezírka v skalní míse se výparová fronta nachází téměř na povrchu. Ve větší vzdálenosti již vliv jezírka není znát, u ostatních bodů je výparová fronta v téměř stejné hloubce bez ohledu na vzdálenost od jezírka.

Tabulka 6.5: Profil šikmou stěnou od hladiny v skalní míse

Moqui Canyon 1	vzdálenost od hladiny vody [cm]	výška nad hladinou [cm]	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti
1	45	10	0,1	12
2	90	26	0,8	11
3	155	37	0,6	19

Moqui Canyon 2

První den (16. 10. 2018) byl vytvořen profil od hladiny jezírka ve skalní míse, přes hřbet do sousední skalní mísy, která ale byla bez vody, vyplněná pouze vlhkým pískem (tabulka 6.6). Druhý den (17. 10. 2018) i přes noční dešť došlo k vyschnutí skalní mísy, ale výparová fronta byla vlivem deště blíže k povrchu než předchozí den. Třetí den od rána do čtyř hodin pršelo, po ustání deště došlo k vystoupaní vody v kaluži a k zatopení otvoru číslo 1. Výparová fronta se všude nacházela až na povrchu.

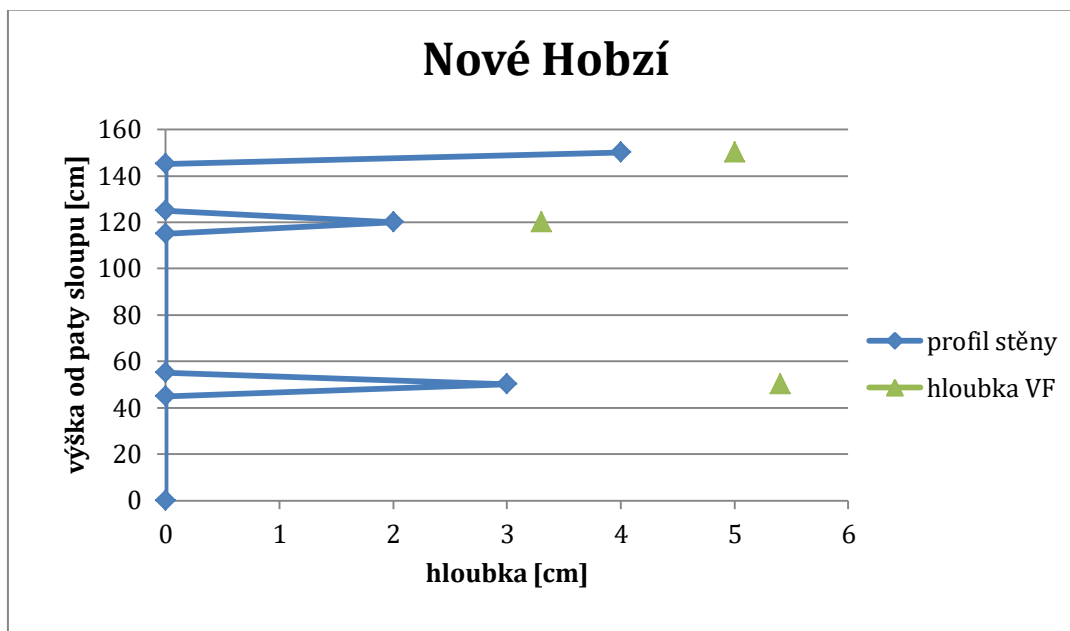
Tabulka 6.6: Moqui Canyon 2 – profil z druhé skalní mísy 1 den

č.	vzdálenost od hladiny vody [cm]	vzdálenost od nejvyššího bodu [cm]	výška nad hladinou [cm]	16. 10. 2018		17. 10. 2018	
				hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti
1	38	\	18	0,3	15	0,1	21
2	95	\	45	0,8	12	0	25
3	148	\	46	1,3	11	0,2	23
4	227	\	65	1,7	9	0,2	21
5	310	\	115	1,3	8	0,4	18
6	\	187	132	2,4	7	0,8	19
7	\	288	65	1,5	11	0,3	21
8	\	350	45	1,4	11	0,2	19

Z naměřených dat je patrné, že na straně se skalní mísou je výparová fronta blíže k povrchu než na straně s mísou bez vody. To ale může být ovlivněno i sklonem vrstev, světovou orientací a směrem větru. Měření také ukázalo, jak dynamicky se může hloubka výparové fronty měnit – přestože v noci z 16. na 17. 10. přšlo, následující den (hh:mm) byla výparová fronta v hloubce až 0,8 cm (č. 6). Vzhledem k tomu, že 16. 10. byla v hloubce 2,4 cm, dá se předpokládat, že byla výparová fronta během noci kvůli dešti až na povrchu a během několika hodin klesla o 0,8 cm.

Nové Hobzí

Z naměřených dat (obr. 6.22) je patrné, že výparová fronta není vždy ve stejné hloubce pod povrchem, ale ani nekopíruje povrch stěny. Je to pravděpodobně dáno vlastnostmi jednotlivých cihel, které byly v různých stádiích rozpadu a také pojivým materiálem, který v některých místech vypadával. V nerozpadlých cihlách se vrták přehříval, tupil a nevrtal a nebylo v nich tak možné měřit hloubku výparové fronty.



Obr. 6.22: Graf profilu stěny a hloubka výparové fronty

Brandov

V Brandově i přes značnou vlhkost cihel na pohled a měřením vodivosti se ve většině případů nepodařilo zastihnout výparovou frontu novou metodou (tabulka 6.7). Výparová fronta byla zachycena na profilu č. 2 na čtyřech bodech (tabulka 6.8), z toho na třech byla přímo na povrchu. To je dáno pravděpodobně vlhkostí z půdního pokryvu nad tímto profilem.

Tabulka 6.7: Brandov – profil 1

h	h VF [cm]	ukazatel vlhkosti
35	>2.5	13
70	>3.5	15
100	>3.5	19

140	>3.5	19
180	>3.5	20

Tabulka 6.8: Brandov – profil 2

h [cm]	h VF [cm]	ukazatel vlhkosti
10	>2	25
25	>2.5	22
60	0,2	18
85	0	19
100	0	22
130	0	25

Hřebečníky

Z naměřených dat (tabulka 6.9) je patrné, že zásadní vliv na hloubku výparové fronty má okolní malta. V případě vypadání malty dochází snázeji k vysychání stavebního materiálu. Suchá malta, která se již vydroluje a je těsně před vypadnutím, již zřejmě neumožňuje tok kapilární vody mezi bloky zdiva a výparová fronta v ní nebyla nalezena.

Tabulka 6.9: Hřebečníky

h [cm]	h VF [cm]	
20	0	cihla v maltě
40	0	cihla v maltě
130	0	břidlice v maltě
150	>3.5	břidlice - bez malty kolem
155a	>3.5	cihla - bez malty kolem
155b	0,3	cihla v maltě
125	>3	suchá malta
130	>3	
160	>3	

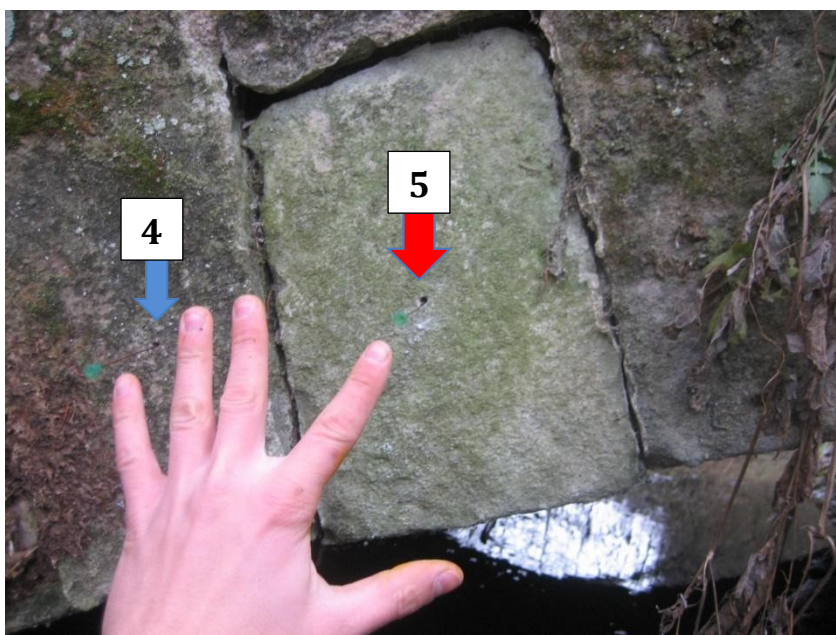
Most v Prokopském údolí

Zde byla VF většinou přímo na povrchu (tabulka 6.10), ale na měřeném bodě č. 5 nebyla výparová fronta zastižena do hloubky 3,5 cm. Je to dáno pravděpodobně tím, že tento pískovcový blok je vypadlý (obr. 6.23) a špatně hydraulicky komunikuje s okolím. Také se na něm nevyskytuje biokrusta. V měřeném bodu č. 4. je výparová fronta v hloubce 2 cm, což je možná kvůli tomu, že tento bod je v blízkosti vypadlého bloku, který ho ovlivňuje.

Tabulka 6.10: Most v Prokopském údolí

č.	vzdálenost od hrany oblouku [cm]	h VF [cm]
1	15	0
2	12	0

3	10	0
4	15	2
5	15	>3.5
6	17	1,4
7	13	0
8	13	0
9	11	0
10	50	0
11	75 (15 od shora)	0



Obr. 6.23: Detail částečně vysunutého kamene s měřeným bodem č. 4 a č. 5

Pražský hrad

Na Pražském hradě jsem zjistil, že výparová fronta dosahuje k povrchu do výšky 120 cm nad hladinou podzemní vody (tabulka 6.11). Ve výšce 155 cm nad hladinou podzemní vody byla výparová fronta v hloubce 0,9 cm a v 195 cm v hloubce 1,6 cm.

Tabulka 6.11: Pražský hrad

bod	výška nad zemí [cm]	výška nad HPV [cm]	hloubka VF [cm]
1	30	45	0
2	70	85	0
3	105	120	0
4	140	155	0,9
5	180	195	1,6

Stěna pod Pekařovou bránou

Z naměřených dat (tabulka 6.12) je patrné, že i ve stěně z homogenního materiálu se vlhkost nešíří zespoda. Na této lokalitě došlo ke stejnému jevu jako v Hřebečnících, kde byl vliv spojovací směsi a reliéfu.

Tabulka 6.12: Stěna pod Pekařovou bránou

č.	výška nad zemí [cm]	hloubka VF [cm]
1	17	0,2
2	50	1,6
3	110	1
4	175	2,3

Tafoni a voštiny

Helper 1

První den jsem zastihl výparovou frontu pouze ve dvou otvorech. Přes noc ze dvou otvorů vypadla ucpávací folie nebo ji vytahala nějaká zvířata. To mohlo mít vliv na výparovou frontu, protože v jednom otvoru již nebyla následující den zastižena. Tabulka 6.13 ukazuje, že uvnitř tafone A byla průměrná hloubka výparové fronty 5,2 cm se směrodatnou odchylkou 3,2 cm. Vně tafone A nebyla výparová fronta zastižena.

Tabulka 6.13: Helper 1 – tafone A

Tafone A	hloubka VF [cm] - uvnitř	ukazatel vlhkosti - uvnitř	hloubka VF [cm] - vně	ukazatel vlhkosti - vně
	5,6	13	>10,1	13
	6,5	13	>12,9	8
	>8,7	8	>9,5	10
	7,6	6	>9,5	13
	>1,9	12	>6,5	11
	1,2	13		
	0,3	6		
průměr	5,2	10,1		11,0
směrodatná odchylka	3,2	3,1		1,9

V tafone B jsem první den měřil v pěti otvorech. Přes noc jsem všechny ucpal folií, ale z dvou otvorů přes noc folie vypadla. Druhý den jsem vyvrtal další čtyři otvory. Z naměřených (tabulka 6.14) dat je patrné, že výparová fronta uvnitř tafone se nacházela blíže než vně, ale i tam byla výparová hloubka ve značné hloubce (průměrná hloubka 4,4 cm) a v některých případech nebyla zastižena vůbec. Vně tafone B jsem většinou výparovou frontu nezastihl vůbec.

Tabulka 6.14: Helper – tafone B

Tafone B	hloubka VF [cm] - uvnitř	ukazatel vlhkosti - uvnitř	hloubka VF [cm] - vně	ukazatel vlhkosti - vně
	3,4	6	>11,4	13
	0,8	6	>12,5	11
	2,7	10	5,8	13
	3,9	15	4,2	13
	2,5	8	>9,4	11
	1,4	8		
	>11	11		
	5,8	13,5		
průměr	4,4	9,7	11	12,2
směrodatná odchylka	4,2	3,1	5,0	1,0

Ve stěně po odtržení tafone je patrné (tabulka 6.15), že hloubka v iniciálních důlkách (ST4) je blíže k povrchu než u hladké stěny. To podporuje hypotézu o vzniku tafone.

Tabulka 6.15: Hloubka výparové fronty na stěně po odtržení tafone

místo	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti
ST1	4,0	12
ST2	3,4	18
ST3	4,3	11
ST4	1,4	13

Crystal peak

Z následujících dat (tabulka 6.16) je patrné, že se uvnitř tafoni nachází výparová fronta ve větší hloubce než vně. Průměrná hloubka výparové fronty uvnitř tafoni je 6,6 cm, zato vně 0,9 cm. To je pravděpodobně zapříčiněno srážkami, které dopadají na povrch vně tafoni.

Tabulka 6.16: Hloubka výparové fronty na lokalitě Crystal peak

Tafone	hloubka VF [cm] - uvnitř	ukazatel vlhkosti - uvnitř	hloubka VF [cm] - vně	ukazatel vlhkosti - vně
A	2,9	23	0,5	20
	>9,1	22	0,2	22
	>10,6	26	1,5	19
			1,4	18
			0,7	18
B	3,7	25	1,4	18
	0,7		0,8	17
C	3,7	25	0,9	23
	2,4	18	0,3	22
			0	26

D	>6,7	27	0,2	20
			2,4	20
			1,5	19
průměr	6,6	23,7	0,9	20,2
směrodatná odchylka	5,5	2,8	0,7	2,4

Moqui canyon 5

Z naměřených dat (tabulka 6.17) je patrné, že výparová fronta vně voštin je blíže k povrchu než uvnitř. Průměrná hloubka výparové fronty uvnitř voštin je 1,2 cm a vně 1 cm. Je to pravděpodobně dáno tím, že výparová fronta je dynamický systém a měření nebylo opakováno, takže je možné, že hloubka byla ovlivněna předchozím deštěm.

Tabulka 6.17: Hloubka výparové fronty ve voštinách na lokalitě Moqui canyon 5

místo	hloubka VF [cm] - uvnitř	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm] - vně	ukazatel vlhkosti
1	1,9	22	0,2	21
2	0,4	22	2,6	20
3			1	20
4			0	16
průměr	1,2	22	1,0	19,3
směrodatná odchylka	0,8	0	1,0	1,9

Topaz peak

Na lokalitě Topaz peak se potvrdilo měření z předchozích lokalit, že výparová fronta je dynamický systém, jehož chování je složité a proměnné v čase a bez opakování měření a porovnání s meteorologickými daty nelze vyvozovat závěry. Na této lokalitě (tabulka 6.18) byla výparová fronta v průměru nepatrně blíže k povrchu vně kaveren než uvnitř. Průměrná hloubka výparové fronty vně kaveren byla 2,6 cm a uvnitř 2,9 cm.

Tabulka 6.18: Hloubky výparové fronty na lokalitě Topaz peak

tafone	hloubka VF [cm] - uvnitř	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm] - vně	ukazatel vlhkosti
A	6,2	19	2,2	16
			0,9	20
B			2,1	17
C	1,5	19	1,0	20
			1,9	19
D	1,1	24	>3,6	16
	1,5	26	1,5	17
	5,7	23	5,9	21
	1,0	22		

E	3,1	25	5,0	21
F	2,2	22		
	4,5	22		
	1,7	25		
průměr	2,9	22,7	2,6	18,3
směrodatná odchylka	1,8	2,3	1,7	2,0

Převisy

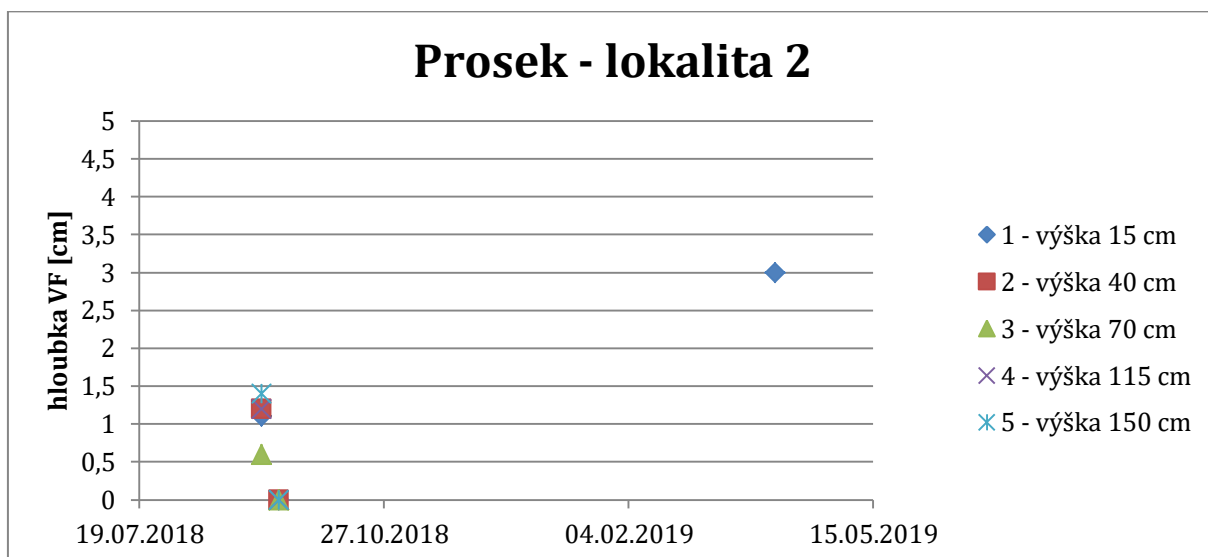
Uvnitř převisu jsem výparovou frontu zastihl v hloubce od 0,3 do 7 centimetrů. Mimo převis jsem výparovou frontu nezastihl ani v hloubce 27,9 cm. V druhém převisu byla v jednom otvoru výparová fronta v hloubce 0,2 centimetrů a v druhém přímo na povrchu. Měření v převisech sice (tabulka 6.19) ukázalo, že uvnitř převisu je hloubka výparové fronty blíže povrchu než v jednom bodě mimo převis, ale ke zobecnění by bylo zapotřebí naměřit dat více.

Tabulka 6.19: Měření v převisech – Moqui canyon 3 a 4

místo	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti
1	0,3	15
2	2,6	19
3	1,2	19
4	7,0	17
B	>29	14
ALK2a	0,2	16
ALK2b	0	23

Opakované sledování hloubky výparové fronty

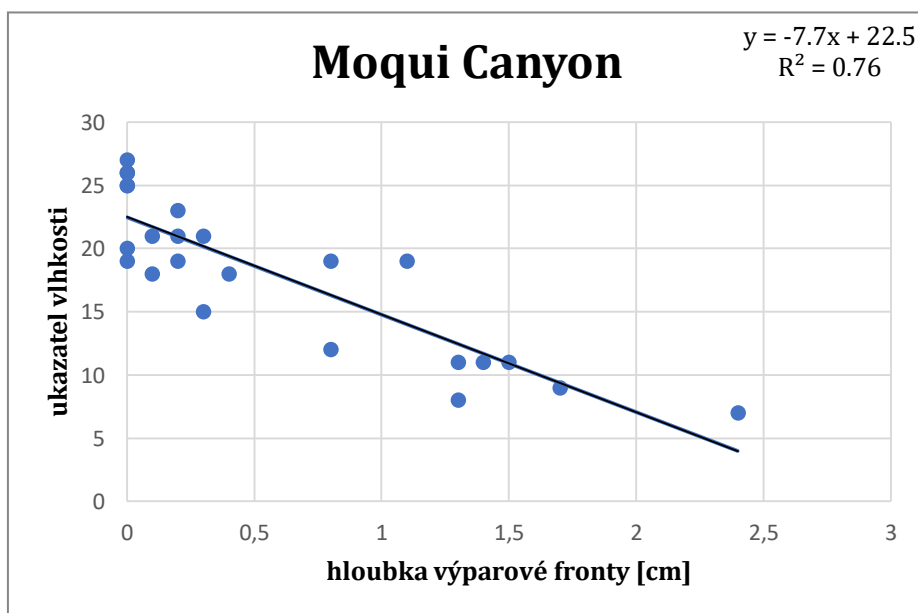
Na lokalitě 1 a 3 nedošlo k zastížení výparové fronty ani jednou v žádném z měřených otvorů. Na lokalitě 2 došlo k zobrazení výparové fronty ve dnech 7. 9., 14. 9. na všech pěti měřených bodech a 5. 4. na měřeném bodě č. 1 (obr. 6.24). Změna nastává po dešti, kdy dojde ke zvýšené dotaci vody infiltrací z půdy nebo přímo dopadem kapek na povrch materiálu. Srážky do týdne před měřením byly zaznamenány 1., 2. a 7. 9., 13. 9. a 30. 3.



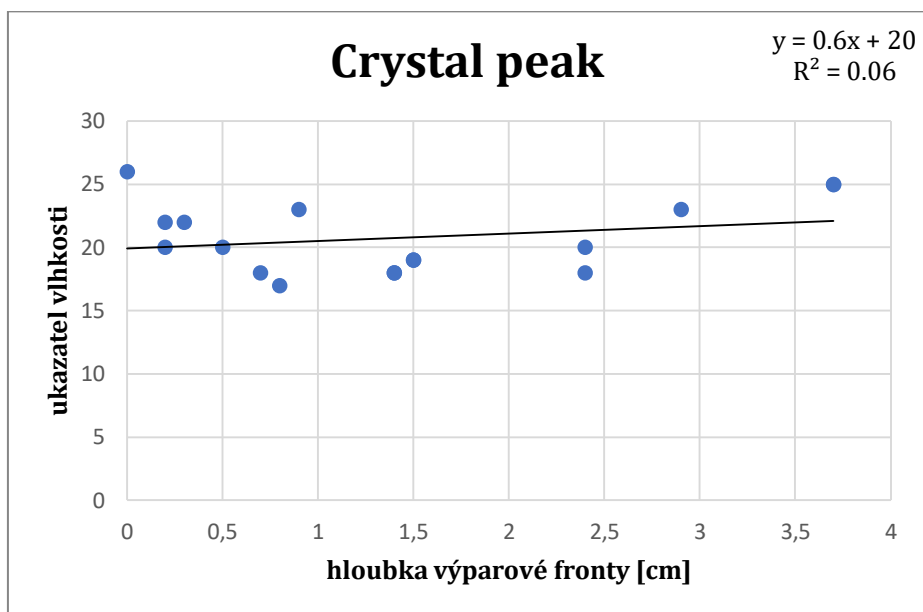
Obr. 6.24: Graf hloubky výparové fronty v čase v Proseku pro lokalitu 2

Porovnání metody měření hloubky výparové fronty s měřením vlhkosti protimetrem

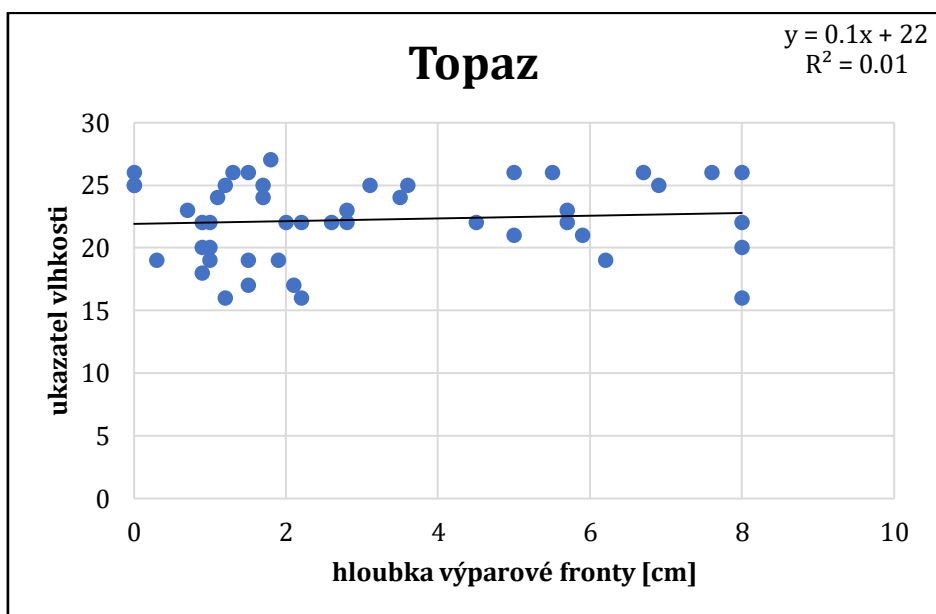
Výparová fronta se na lokalitě Moqui Canyon 1 a 2 od povrchu do 2,5 cm, na lokalitě Crystal peak od 0 do 4 cm a na lokalitě Topaz mountain od povrchu do 8 cm. Referenční hodnota vodivosti (ukazatel vlhkosti) byla na lokalitě Moqui Canyon 1 a 2 od 7 do 27, na lokalitě Crystal peak a Topaz mountain od 15 do 27.



Obr. 6.25: Graf ukazatele vlhkosti v závislosti na hloubce výparové fronty pro lokality Moqui canyon 1 a 2



Obr. 6.26: Graf ukazatele vlhkosti v závislosti na hloubce výparové fronty pro lokalitu Crystal peak



Obr. 6.27: Graf ukazatele vlhkosti v závislosti na hloubce výparové fronty pro lokalitu Topaz peak

U lokalit Moqui Canyon 1 a 2 je zřejmá závislost ukazatele vlhkosti na hloubce výparové fronty (obr. 6.25), ale u ostatních (obr. 6.26 a 6.27) nemá hloubka výparové fronty žádný vliv. Je to pravděpodobně zapříčiněno výskytem solí, které zvyšují vodivost až na takové hodnoty, jaké má úplně mokrý materiál (24–27).

7. Závěr

Podařilo se mi vytvořit metodu k určování hloubky výparové fronty v úzkém otvoru o průměru 3–5 mm. Metoda spočívá ve vyvrtání otvoru, odstranění prachu z vrtání ruční vzduchovou pumpičkou a vložení jehly. Na jehle je naneseno polyuretanové lepidlo, které je obalené ve vodorozpuštěném barvivu uraninu. Na tuto metodu byla podána patentová přihláška PV 2018-689 (Weiss et al., 2018b).

Metodu jsem testoval na několika lokalitách v humidním klimatu Českého ráje, a později v aridním klimatu v Utahu ve Spojených státech amerických. Metodu jsem ověřil pomocí porovnání s metodou zobrazení výparové fronty barvivem v prášku v širokém otvoru, kde jsem dosáhl totožné hloubky výparové fronty. Použití této metody je omezeno při vyšších vzdušných vlhkostech, při kterých dojde k reakci barviva na jehle s vzdušnou vlhkostí.

Zjištěná výparová fronta na přírodních výchozech v humidním klimatu se většinou nachází od povrchu do hloubky 5 cm. Hluběji se výparová fronta vyskytuje pouze v místech, kde nemá dostatečný přísun vody z masivu, což může být zapříčiněno hydraulickou izolací, například puklinou. V aridním klimatu se mi na některých lokalitách se mi nepodařilo výparovou hloubku nalézt vůbec, a to na jedné lokalitě ani v 29 cm pod povrchem. Je tedy pravděpodobné, že v aridním klimatu nedochází k dostatečné dotaci vodou z masivu, tudíž výparová fronta zakleslá do hloubek desítek centimetrů.

Jehlová metoda umožňuje zobrazení výparové fronty v porézních materiálech na skalních výchozech i stavbách z pískovce a cihel, což může výrazně zlepšit znalosti o výparu z porézního prostředí a pozici výparové fronty a převládajícím zdroji vlhkosti. Tyto znalosti jsou kritické pro pochopení řady důležitých procesů souvisejících s vlhkostí a jejím transportem v porézním prostředí.

V budoucnu bych se v tomto směru chtěl zabývat dlouhodobým měřením hloubky výparové fronty na různých lokalitách, abych lépe pochopil dynamiku výparové fronty. Také bych chtěl využít měření hloubky VF jehlovou metodou pro lepší interpretaci měření vlhkostí a sacího tlaku.

8. Seznam použité literatury

Baker P. H., Bailly D., Campbell M., Galbraith G. H., McLean R. C., Poffa N., Sanders C. H. (2006): The application of X-ray absorption to building moisture transport studies. *Measurement* 40, 951-959, doi:10.1016/j.measurement.2006.10.016

Bell J. P., McCulloch J. S. G. (1966): Soil moisture estimation by the neutron scattering method in Britain, *at. Hydrol.*, 4, 254-263

Bittelli M., Ventura F., Campbell G. S., Snyder R. L., Gallegati F., Pisa P. R. (2008): Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in

bare soils. *J. Hydrol.* 362, 191–205, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.014>.

Bruthans J., Soukup J., Vaculíková J., Filippi M., Schweigstillova J., Mayo A. L., Mašín D., Kletetschka G., Řihošek J. (2014): Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience* 7(8): 597-601.

Bruthans J., Filippi M., Slavík M., Svobodová E. (2018): Origin of honeycombs: testing the hydraulic and case hardening hypotheses. *Geomorphology* 303, 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.013>.

Coles M. E., Hazlett R. D., Spanne P., Soll W. E., Jones K. (1998): Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography, *J. Petro. Sci. Eng.* 19, 55–63.

Dunn D. E. (1959): Geology of the Crystal peak area, Millard County, Utah. Master's thesis, Southern Methodist University.

Franzen C., Mirwald P. W. (2004): Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. *Environmental Geology* 46, 391–401, doi 10.1007/s00254-004-1040-1.

Hall C., Hamilton A., Hoff W. D., Viles H. A., Eklund J. A. (2010): Moisture dynamics in walls: response to microenvironment and climate change. *R Soc. Proc. A.* 467, 194–211

Hall C., Hoff W. D. (2012): Moisture Expansivity of Fired-Clay Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 95, 1204–1207. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05109.x

Hauser M., Čtyrský V., Krutský N., Macková E., Bylová I. (1965): Střeleč. Surovina: sklářské a slévárenské písky. *Geoindustria*, Praha. Geofond No. FZ004733.

Hillel D. (2004): *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, Amsterdam.

Hintze L. F. (1988): Geologic History of Utah. Department of Geology, Brigham Young University, 53 – 59.

Charney J. W., Quirk J., Chow S. H., Kornfield J. (1977): A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi arid regions. *Atmos. Sci.*, 34, 1366-1385, 1977.

Chlupáč I. (1999): *Vycházky za geologickou minulostí Prahy a okolí*, Academia, 2., upravené vydání, Praha, 183–190.

Churayev N. V., Rode L. G. (1966): Measuring the moisture content of organic peat soils by the neutron method, *Pochvovedenie*, 1, 96-100,

Idso S. B., Reginato R. J., Jackson R. D., Kimball B. A., Nakayama F. S. (1974): The three stages of drying of a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38, 831. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800050037x>.

Idso S. B., Jackson R. D., Reginato R. J. (1975): Detection of soil moisture by remote surveillance. *Amer. Sci.*, 63, 549-557.

Jandák J., Prax A., Pokorný E. (2007): *Půdoznalství*. 1. vydání. Brno, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, ISBN: 978-80-7157-559-7

Kamai T., Tuli A., Kluitenberg G. J., Hopmans J. W. (2008): Soil water flux density measurements near 1 cm.d⁻¹ using an improved heat pulse probe design. *Water resources research*, Vol. 44, W00D14, doi:10.1029/2008WR007036

Käss W. (1998): *Tracing Technique in Geohydrology*. Balkema, Rotterdam, 581 s

Králík F. (1984): *Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSSR 1:25 000, list 12-243, Praha - sever*. Ústí. Úst. geol. 131 p. Praha.

Kutílek M. (1984): *Vlhkost pórovitých materiálů*. SNTL, Praha, 210 s

La Iglesia A., Gonzlilez V., Lopez-Acevedo V., Viedma C. (1997): Salt crystallization in porous construction materials I: estimation of crystallization pressure. *J Cryst Growth* 117:111–118

Matoušková V., Kandra B., Pražák P. (2013): *Měření retenčních čar bobtnavých půd*. Voda, půda a rostliny, Křtiny, ISBN 978-80-87577-17-2

McBride E. F., Picard M. D. (2000): Origin and development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 869 – 879.

McKinley J. M., McCabe S. (2010): A geostatistical investigation into changing permeability of sandstones during weathering simulations. *Geogr Anal* 42, 180–203

Mol L., Viles H. A. (2010): Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology* 118, 280–287, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.008>.

Mol L., Viles H. (2013): Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions. *Environ. Earth Sci.* 68, 1647–1659, <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1858-x>.

McKim H. L., Bert R. L., McGaw R. W., Atkins R. T., Ingersoll J. (1976): Development of a remote-reading tensiometer/transducer stem for use in subfreezing temperatures, *Proceedings of the Second Conference on Soil-Water Problems in Cold Regions*, 31-45, Edmonton, Alberta, Canada.

Nadrchal J., Smutek D. (2007): *Střeleč - lom, Královohradecký kraj. Monitorování režimu podzemních a povrchových vod. Vyhodnocení prací za rok 2006. - Vodní zdroje Chrudim, Geofond č. P119010*.

O'Brien M. A. (1948): The control of humidity by saturated salt solutions. British electrical and allied industries research association, Vol. 25, London

Or D., Lehmann P., Shahraeeni E., Shokri N. (2013): Advances in soil evaporation physics—a review. *Vadose Zo. J.* 12. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0163>.

Pavlík Z., Pavlíková M., Fiala L., Černý R., Sobczuk H., Suchorab Z. (2007): Application of Time Application of Time-domain Reflectometry Method for Measuring Moisture Content in Porous Building Materials. *Trends in Applied Sciences Research* 2, 188 – 200.

Richards L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>.

Sass O, Viles H. (2010): Wetting and drying of masonry walls: 2D resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *J Appl Geophys* 70(1):72–83

Shahidzadeh-Bonn N., Azouni A., Coussot P. (2007): Effect of wetting properties on the kinetics of drying of porous media. *Journal of Physics: Condensed Matter* 19, doi:10.1088/0953-8984/19/11/112101

Shokri N., Or D. (2011): What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media? *Water Resour. Res.* 47. <https://doi.org/10.1029/2010wr010284>.

Schnepfleitner H., Sass O., Fruhmann S., Viles H. A., Goudie A. (2015): A multi-method investigation of temperature, moisture and salt dynamic in tafoni (Tafroute, Morocco). *Earth Surf. Process. Landforms*, doi: 10.1002/esp.3838

Slavík M. (2014): Propustnost přírodních povrchů hruboskalského pískovce ve skalních městech pro vodní páru a intenzita výparu. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ustav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky.

Slavík M., Bruthans, J., Filippi M., Schweigstillová J., Falteisek L., Řihošek J. (2017): Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. *Geomorphology* 278, 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.040>.

Smugge T. J., Jackson T. J., McKim H. L. (1980): Survey of Methods for Soil Moisture Determination. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 16, NO. 6, 961-979,

Staatz M. H. a Griffiths W. R. (1961): Beryllium-bearing tuff in the thomas range, Juab County, Utah. *Economic Geology*, 56(5), 941 – 950, doi: 10.2113/gsecongeo.56.5.941.

Svobodová E. (2015): Vlhkost a její transport v přívodní zóně kvádového pískovce. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ustav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky.

Torres J. J., Soler A., Sáez J., Ortuno J. F. (1997) Determination of low concentration of sulphorhodamine B in wastewaters and stabilization ponds. *Water research*, Vol. 31, 3183-3186

Trautz A.C., Smits K.M., Schulte P., Illangasekare T.H. (2014): Sensible heat balance and heat-pulse method applicability to in situ soil-water evaporation. *Vadose Zone Journal*, Vol. 13, <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0215>.

Uličný D. (2001): Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip settings: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Sedimentology* 48: 599–628.

Vahedifard F., Toan C. D., Thota S. K., Ghazanfari E. (2018): Nonisothermal models for soil-water retention curve. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 144, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001939

Viitanen H., Vinha J., Salminen K., Ojanen T., Peuhkuri R., Paajanen L., Lähdesmäki K. (2010): Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of building physics* 33, 201-224

Vohlídal J., Julák A., Štulík K. (1999): *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, ISBN 80-7169-855-5.

Weiss T., Slavík M., Bruthans J. (2018a): Use of sodium fluorescein dye to visualize the vaporization plane within porous media. *Journal of hydrology*

Weiss T., Mareš J., Bruthans J., Slavík M., inventors; Charles University, Faculty of Science, assignee (2018b): The vaporization plane depth measuring method and the apparatus for performing this method (in Czech). Dec 10 2018. Czech Republic Patent Application No. PV 2018-689

Yamanaka T., Yonetani T. (1999): Dynamic of the evaporation zone in dry sandy soils. *Journal of hydrology* 217, 135-148

Příloha 1

lokalita 1		31. 8.		7. 9.		14. 9.		21. 9.		5. 10.		5. 11.		23. 11.		5. 4.
otvor	h [cm]	hloubka VF [cm]	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti	hloubka VF [cm]	ukazatel vlhkosti
1	15	>3,2	>8,4	21	>8,4	22	>8,4	20	>8,4	19	>8,4	23	>8,4	23	>8,4	>8,4
2	30	>3,5	>8	14	>8	16	>8	13	>8	12	>8	17	>8	15	>8	>8
3	50	>3	>7,4	13	>7,4	15	>7,4	12	>7,4	12	>7,4	16	>7,4	15	>7,4	>7,4
lokalita 2																
1	15	>3,8	1,1	17	0	24	>3,8	18	>3,8	19	>3,8	24	>3,8	25	3	
2	40	>3,9	1,2	15	0	19	>3,9	16	>3,9	12	>3,9	21	>3,9	18	>3,9	
3	70	>4	0,6	12	0	18	>4	13	>4	11	>4	23	>4	15	>4	
4	115	>3,8	1,2	15	0	19	>3,8	13	>3,8	14	>3,8	24	>3,8	18	>3,8	
5	150	>3,8	1,4	14	0	22	>3,8	8	>3,8	13	>3,8	25	>3,8	20	>3,8	
lokalita 3																
1	15	>4	>8,2	25	>8,2	25	>8,2	25	>8,2	24	>8,2	26	>8,2	27	>8,2	
2	50	>3,7	>8,4	24	>8,4	25	>8,4	24	>8,4	24	>8,4	25	>8,4	27	>8,4	
3	85	>4,2	>8,2	24	>8,2	25	>8,2	24	>8,2	24	>8,2	25	>8,2	26	>8,2	
4	125	>3,5	>8,3	25	>8,3	26	>8,3	24	>8,3	24	>8,3	26	>8,3	26	>8,3	
5	160	>3,8	>8,6	24	>8,6	24	>8,6	24	>8,6	22	>8,6	26	>8,6	25	>8,6	